

SECADO OSMO-CONVECTIVO CON AIRE CALIENTE DE RODAJAS DE
CARAMBOLO (*Averrhoa carambola L.*)

LIC. ESP. MARÍA DEL CARMEN GÓNGORA CHÁVEZ

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA, ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS
PROGRAMA ACADÉMICO DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA
CON ÉNFASIS EN ALIMENTOS
SANTIAGO DE CALI, SEPTIEMBRE DE 2012

SECADO OSMO-CONVECTIVO CON AIRE CALIENTE DE RODAJAS DE
CARAMBOLO (*Averrhoa carambola L.*)

LIC. ESP. MARÍA DEL CARMEN GÓNGORA CHÁVEZ

Tesis para optar al título de
Magister en Ingeniería de Alimentos

Director
ALFREDO ADOLFO AYALA APONTE Ph. D.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA, ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CON ÉNFASIS EN ALIMENTOS
SANTIAGO DE CALI, SEPTIEMBRE DE 2012

CONTENIDO

RESUMEN	7
INTRODUCCION	8
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
2. JUSTIFICACIÓN	10
3. OBJETIVOS	11
3.1 OBJETIVO GENERAL	11
3.2 OBJETIVO ESPECIFICO	11
4. MARCO DE REFERENCIA	12
4.1. GENERALIDADES	12
4.1.1. DESHIDRATACIÓN OSMOTICA	12
4.1.2. SECADO	13
4.1.3. SECADO OSMO-CONVECTIVO.....	13
4.1.4. EL CARAMBOLO.....	14
4.2. ANTECEDENTES	18
5. MATERIALES Y METODOS.....	20
5.1.2. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA	21
5.3. DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	23
6.4. DIAGRAMA DEL PROCESO DE SECADO.....	28
5.4. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICO – QUÍMICAS.....	29
5.4.2. <i>CONTENIDO DE HUMEDAD</i>	29
5.4.3. <i>ACTIVIDAD DE AGUA:</i>	29
5.4.4. <i>DENSIDAD APARENTE</i>	29
5.4.5. <i>POROSIDAD:</i>	30
5.4.6. <i>VARIACIÓN DE VOLUMEN</i>	30
5.4.7. <i>COLOR</i>	31
5.4.8. <i>COEFICIENTE DE DIFUSIÓN EFECTIVA</i>	31
5.4.9. <i>ENERGÍA DE ACTIVACIÓN</i>	32
6. RESULTADOS Y ANALISIS	33
6.2. CURVAS DEL SECADO DE MUESTRAS FRESCAS Y DESHIDRATAS OSMOTICAMENTE.....	34
6.3. ANALISIS DE SUPERFICIE DE RESPUESTA	35
6.3.1. <i>INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y EL TIEMPO DE SECADO CON AIRE CALIENTE SOBRE LA PÉRDIDA DE HUMEDAD Y PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE MUESTRAS DE CARAMBOLO DESHIDRATADOS OSMOTICAMENTE A 100 MIN.</i>	35
7.3.1.1. COEFICIENTE DE DIFUSIÓN EFECTIVA DE AGUA (D_{EFF})	36
7.3.1.2. <i>ENERGÍA DE ACTIVACIÓN (E_a)</i>	37
7.3.1.3. <i>CONTENIDO DE HUMEDAD</i>	39
7.3.1.4. <i>ACTIVIDAD DE AGUA (a_w)</i>	41
7.3.1.5. <i>DENSIDAD APARENTE (ρ_a)</i>	44
7.3.1.6. <i>POROSIDAD (ϵ)</i>	46
7.3.1.7. <i>VOLUMEN (V)</i>	48
7.3.1.8. <i>COLOR (ΔE^*)</i>	50
7.3.2. <i>INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA ÓPTIMA DE SECADO DE 60-65°C, TIEMPO DE DO Y EL TIEMPO DE SECADO SOBRE LA PÉRDIDA DE HUMEDAD Y PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS</i>	53
7.3.2.1. <i>PÉRDIDA DE HUMEDAD</i>	55
7.3.2.2. <i>ACTIVIDAD DE AGUA (a_w)</i>	57
7.3.2.3. <i>DENSIDAD APARENTE (ρ_a)</i>	60

7.3.2.4. POROSIDAD (ϵ)	62
7.3.2.5. VOLUMEN (V)	65
7.3.2.6. COLOR (ΔE^*)	67
7. CONCLUSION	69
8. BIBLIOGRAFÍA	71
9. ANEXOS	78

LISTAS DE TABLAS

Tabla 1: Características químicas del fruto de carambola ácida del piedemonte amazónico.....	16
Tabla 2: Matriz de diseño correspondiente al DCCR codificada.	24
Tabla 3: Matriz de respuesta según diseño de tratamientos DCCR empleando como tiempo de DO 100 min	26
Tabla 4: Matriz de respuesta según diseño de tratamientos DCCR entre 60-65 °C de temperatura	27
Tabla 5: Matriz de respuesta según diseño de tratamientos DCCR.	36
Tabla 6: Coeficiente de difusión efectiva de agua para carambolo fresco y con tratamiento (Secado osmo-convectivo) durante el secado convectivo con aire caliente a velocidad de aire constante.	37
Tabla 7: Energía de activación para carambolo fresco y con tratamiento (Secado osmo-convectivo) durante el secado convectivo con aire caliente a velocidad de aire constante.	38
Tabla 8: Análisis de varianza (ANOVA) de los parámetros de regresión para el modelo de superficie de respuesta, para el secado osmo-convectivo de carambolo previamente DO a 100 min a 55	38
Tabla 9: Regresión modelo matemático de superficie de respuesta de segundo orden, según diseño de los tratamientos	39
Tabla 10: Matriz de respuesta según diseño de tratamientos DCCR.	53
Tabla 11: Análisis de varianza (ANOVA) de los parámetros de regresión para el modelo de superficie de respuesta, para el secado de carambolo previamente sometidos a deshidratación osmótica. A una temperatura óptima de secado (60-65°C)	54
Tabla 12: Regresión modelo matemático de superficie de respuesta de segundo orden, según diseño de tratamientos, para el secado de carambolos previamente sometidos a deshidratación osmótica. A una temperatura óptima de secado (60-65°C)	54
Tabla 13: Matriz de respuesta pérdida de humedad según el diseño DCCR.	79
Tabla 14: Análisis de varianza (ANOVA) para la pérdida de humedad.	80
Tabla 15: Regresión para superficie de respuesta de segundo orden pérdida de humedad.	80

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1: Carambolo (Averrhoa carambola L)	20
Figura 2: Tabla de color carambolo (Averrhoa carambola L) (García y Mejía, 2004).	20
Figura 3: (a) Láminas de sección circular de carambolo.	21
Figura 4: Túnel de Secado con aire caliente.	23
Figura 5: Modelo matemático para el proceso de secado para placa infinita de sección circular de carambolo previamente sometidos a DO.	25
Figura 6: Modelo matemático para el proceso de secado para placa infinita de sección circular de carambolo previamente sometidos a 100 min de deshidratación osmótica.	26

Figura 7: Modelo matemático para el proceso de secado para placa infinita de sección circular de carambolo previamente sometidos a deshidratación osmótica y secados convectivamente entre 60 y 65 °C.	27
Figura 8: Proceso experimental para el secado de carambolo previamente sometidos a deshidratación osmótica.	28
Figura 9: Cinética de deshidratación osmótica de carambolo a 45, 55 y 65 °Brix y temperatura... ..	33
Figura 10: Curvas de secado de carambolo fresco y deshidratadas osmoticamente a 100 min a 55 °Brix.	34
Figura 11: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto de la temperatura de secado y el tiempo de secado sobre la pérdida de humedad de carambolos sometidos a 100 min de deshidratación osmótica.	41
Figura 12: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto de la temperatura de secado y el tiempo de secado sobre la aw de carambolos sometidos a 100 min de deshidratación osmótica.	43
Figura 13: Figura 132: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto de la temperatura de secado y el tiempo de secado sobre la pa de carambolos sometidos a 100 min de deshidratación osmótica.	45
Figura 14: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto de la temperatura de secado y el tiempo de secado, sobre la ϵ de los carambolos sometidos a 100 min de deshidratación osmótica.	47
Figura 15: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto de la temperatura de secado y el tiempo de secado sobre el cambio de volumen de carambolos sometidos a 100 min de deshidratación osmótica.	49
Figura 16: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto de la temperatura de secado y el tiempo de secado sobre la variación del color en carambolos sometidos a 100 min de deshidratación osmótica.	52
Figura 17: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto del tiempo de deshidratación osmótica y el tiempo de secado sobre la pérdida de humedad de carambolos sometidos a una temperatura de secado entre 60 - 65 ° C.	57
Figura 18: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto del tiempo de deshidratación osmótica y el tiempo de secado sobre la aw de los carambolo sometidos a una temperatura de secado entre 60 - 65 °C.	59
Figura 19: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto del tiempo de deshidratación osmótica y el tiempo de secado sobre la pa de carambolos sometidos a una temperatura de secado entre 60 - 65 ° C.	62
Figura 20: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto del tiempo de deshidratación osmótica y el tiempo de secado, sobre la ϵ de carambolos sometidos a una temperatura de secado entre 60 - 65 ° C.	64
Figura 21: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto del tiempo de deshidratación osmótica y el tiempo de secado sobre el cambio de volumen de carambolos sometidos a una temperatura de secado entre 60 - 65 ° C.	66
Figura 22: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto del tiempo de deshidratación osmótica y el tiempo de secado sobre la variación del color en carambolos sometidos a una temperatura de secado entre 60 - 65 ° C.	68
Figura 23: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto de la temperatura y el tiempo de deshidratación osmótica sobre la pérdida de humedad en un tiempo de secado de 60 min.	82
Figura 24: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto de la temperatura y el tiempo de deshidratación osmótica sobre la pérdida de humedad en un tiempo de secado de 120 min.	83
Figura 25: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto de la temperatura y el tiempo de deshidratación osmótica sobre la pérdida de humedad en un tiempo de secado de 180 min.	84

Figura 26: El contorno que muestra el efecto de la temperatura y el tiempo de deshidratación osmótica sobre la pérdida de humedad en un tiempo de secado de 60, 120 y 180 min. 85

LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1: Pre-liminares contenido de humedad de la deshidratación osmótica de carambolo. ...	78
ANEXO 2: Cálculos difusividad y energía de activación del carambolo a 100 min de deshidratación osmótica y temperaturas de secado de 50, 60 y 70 ° C.	78
ANEXO 3: Gráfica porosidad Vs Contenido de humedad del carambolo a 100 min de deshidratación osmótica y temperatura de secado de 50, 60, y 70 ° C.	91

RESUMEN

Se estudió el efecto de la técnica combinada de la deshidratación osmótica y el secado convectivo con aire caliente sobre las propiedades físico-químicas relacionadas con la calidad de rodajas de Carambolo (Averrhoa carambola L. Empleando una solución osmótica (SO) de sacarosa con un nivel de 55 °Brix. Las rodajas de carambolo se sumergieron en la SO a 28 °C, con una relación fruta-sacarosa de 1:15 a diferentes tiempos de DO. La SO se agitó a 1000 r.p.m. mediante un agitador mecánico. Las muestras deshidratadas osmóticamente y las frescas se sometieron a secado convectivo entre 50 a 70 °C (de acuerdo al diseño experimental central compuesto rotatable) y un flujo de aire de 0.90 m/s, para ello se empleó un secador de túnel de aire caliente. A diferentes tiempos de secado se determinó el CH, a_w , ρ_a , ε , V y color (coordenadas L, a y b). Los resultados mostraron que el mayor efecto en los tratamientos se presenta a 100 min de deshidratación osmótica, temperaturas de secado entre 60-65°C a tiempos de secado de 140 min. Los carambolos sometidos a estas condiciones de osmo-secado inciden significativamente sobre la pérdida de humedad, densidad aparente, porosidad y ΔE . Los resultados sugirieron que la técnica combinada es apropiada para el carambolo debido a la pérdida de humedad durante los procesos, garantizando condiciones para el almacenamiento del producto.

INTRODUCCION

La carambola (*Averrhoa carambola* L.) es una fruta exótica muy cotizada en los mercados internacionales, conocida popularmente como “fruta estrella” o “star fruit”. Pertenece a la familia de las Oxalidáceas. (Andrade y Moreno, 2010). La fruta posee importantes beneficios para el organismo por su alto contenido en vitaminas A y C indispensables para la salud de los seres humanos.

En Colombia la comercialización del carambolo se realiza en fresco y por su alto contenido de humedad y enzimas hace que sea un producto altamente perecedero, lo cual es un limitante para su conservación. El agua es uno de los componentes principales de los alimentos ya que tienen influencia directa en la calidad y duración del producto alimenticio a través de su efecto en muchos de los cambios biológicos, químicos y físicos. (Lenart, 1996).

Como alternativa de conservación de alimentos existen diversos métodos como la deshidratación o el secado. La deshidratación osmótica (DO) es uno de los métodos de deshidratación ampliamente utilizado para eliminar el contenido de humedad de las frutas para obtener un producto intermedio de humedad, pero su mayor aplicación es como pre-tratamiento antes de un proceso adicional Torreggiani y Bertolo (2001). Cuando la DO se combina con secado con aire caliente es llamado osmo-secado u osmo-convectivo. Este método osmo-secado es una alternativa para la conservación de frutas y hortalizas, por disminución del tiempo de secado y reducción de pérdidas de calidad del producto seco, o para mejorar el estado sensorial, funcional y nutricional, del alimento. También puede prolongar la vida útil del producto final debido al aumento en azúcares/ácidos, protegiendo a textura y la estabilidad del pigmento de color durante el almacenamiento. (Pani et al., 2008). El proposito de esta propuesta es evaluar el efecto de la técnica combinada de la deshidratación osmótica y el secado convectivo con aire caliente sobre las propiedades físico-químicas relacionadas con la calidad de rodajas de Carambolo (*Averrhoa carambola* L.).

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El secado convectivo es uno de los métodos mas utilizados como conservación de alimentos, debido a la reducción de la actividad de agua y disminución del riesgo de desarrollo microbiano; emplea relativamente altas temperaturas entre 60 y 80°C que son perjudiciales para la calidad del producto seco. Se ha demostrado que el secado con aire caliente en la mayoría de los vegetales ocasiona deterioro de los nutrientes y cambios en las propiedades físicas y fisicoquímicas disminuyendo la calidad de producto seco (Abonyi *et al.*, 1999; Lewicki *et al.*, 2001; Ruíz *et al.*, 2010). Actualmente se buscan alternativas para reducir la pérdida de calidad de los vegetales deshidratados mediante técnicas combinadas como la deshidratación osmótica y el secado convectivo llamado osmosecado. El carambolo, como la mayoría de las frutas, por ser un fruto con alto contenido de humedad, alto contenido en azúcares y vitamina C, no es ajeno a los problemas mencionados, por esta razón se usará en esta experimentación.

2. JUSTIFICACIÓN

En Colombia la Averrhoa cambola produce 351.4 kg/año /árbol (Villegas, 1998) por su alto contenido de humedad y enzimático, el fruto es perecedero y se dificulta su conservación. Con esta propuesta se pretende aplicar la técnica combinada de deshidratación osmótica y secado convectivo (osmo-secado) con aire caliente como alternativa para reducir la pérdida de calidad de los vegetales deshidratados. La deshidratación osmótica como pre-tratamiento es uno de los procesos alternativos simples y de bajo costo. La aplicación de la técnica de osmosecado se emplea para reducir el contenido de agua inicial de la fruta antes del secado convectivo con aire caliente, provocando reducción del tiempo del secado, retención de nutrientes, inhibición de actividad enzimática, conservación del color de la fruta natural (sin adicción de sulfuros) y aromas volátiles (Pokharkar et al., 1997). Por otro lado, La combinación de estas técnicas permite obtener productos nuevos y estables.

El carambolo por su alto contenido de humedad y fruto promisorio se seleccionó como fruta modelo para evaluar el efecto de la técnica combinada de deshidratación osmótica y secado convectivo con aire caliente (osmo-secado) sobre las propiedades físico-químicas relacionadas con la calidad del producto).

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la técnica combinada de deshidratación osmótica y secado convectivo con aire caliente sobre propiedades fisicoquímicas relacionadas con la calidad de las rodajas de carambolo (*Averrhoa carambola L.*)

3.2 OBJETIVO ESPECIFICO

- Determinar el efecto de la temperatura sobre el contenido de humedad, actividad de agua, densidad, porosidad, volumen, color de rodajas de carambolo (*Averrhoa carambola L.*) durante el secado convectivo con aire caliente.
- Establecer la influencia del pre-tratamiento osmótico, previo al secado convectivo con aire caliente sobre el contenido de humedad, actividad de agua, densidad, la porosidad, el volumen, el color, de rodajas de carambolo (*Averrhoa carambola L.*)

4. MARCO DE REFERENCIA

4.1. GENERALIDADES

4.1.1. DESHIDRATACIÓN OSMOTICA

La deshidratación osmótica (DO) es un proceso que permite obtener alimentos parcialmente deshidratado (Mújica et al., 2003) debido a que este proceso implica la inmersión del producto en una solución hipertónica acuosa que conduce a una pérdida de agua, a través de las membranas celulares del producto (Serenio et al., 2001). La fuerza impulsora para la eliminación del agua se ajusta a causa de una diferencia en la presión osmótica entre el alimento y su solución circundante. La compleja estructura celular del alimento actúa como una membrana semi-permeable (Fernandez et al., 2006)

Durante el proceso de deshidratación osmótica en flujo a contracorriente puede ocurrir tres tipos de transferencia de masa: 1) flujo de agua desde el producto al soluto, 2) La transferencia de soluto a partir de la solución a los productos, 3) Flujo de los solutos naturales (azúcar orgánica, minerales, ácidos, vitaminas etc) de la fruta a la solución (Park et al., 2002).

La eficiencia del comportamiento osmótico es altamente dependiente del agente osmótico utilizado (McMinn et al., 1999). Varios agentes osmóticos, tales como sacarosa, glucosa, fructosa, jarabe de maíz y cloruro de sodio, se han utilizado para la deshidratación osmótica. Por lo general, soluciones de azúcar se utilizan para la deshidratación osmótica de frutas (Vijayanand et al., 1995).

4.1.2. SECADO

El secado es el método más antiguo en la conservación de los alimentos, y su objetivo es eliminar por evaporación la mayor parte de agua presente en el producto. La reducción del contenido de humedad inhibe o disminuye la actividad microbiana y enzimática, que de otro modo produciría daños en el alimento. Además, la deshidratación del producto permite la manipulación del alimento debido a la contracción volumétrica y la pérdidas de peso del producto.(Ochoa et al., 2002). El secado permite la eliminación de agua a una concentración final, lo que asegura la estabilidad microbiana y la vida útil del producto en almacenamiento. (Lewick, 2006).

El secado con aire caliente consiste en el paso del aire sobre el producto a ser secado.

Normalmente, el aire se calienta antes de entrar a la región de secado. La superficie de la porción visible del producto a secar será cubierto con agua inmediatamente después de cortar.

Como el agua se evapora, la superficie del producto es ligeramente seca. La humedad no puede moverse desde el interior del tramo de la forma más rápida, ya que puede evaporarse en la superficie. Por lo tanto, el factor que rige en las etapas posteriores de secado es la velocidad de difusión de humedad dentro del producto. (Wilhelm, 2004).

4.1.3. SECADO OSMO-CONVECTIVO

De los diversos métodos de prolongación de la vida útil de productos perecederos, la deshidratación osmótica como pre-tratamiento es uno de los procesos alternativos simples y de bajo costo. El pre-tratamiento con deshidratación osmótica es el proceso en el cual el agua es parcialmente eliminada de los materiales celulares cuando estos se colocan en una solución concentrada de solutos solubles. Sin embargo hay una cantidad de agua que queda en el alimento. Esto no garantiza su estabilidad, ya que

la actividad del agua es generalmente superior a 0,9. Como la estabilidad del alimento es el principal objetivo, se utilizan otros métodos complementarios para retirar el agua tal como el secado convectivo (Singh y Gupta, 2007). La deshidratación osmótica se utiliza también para tratar los productos frescos antes del secado para mejorar las propiedades sensoriales, funcionales y nutricionales del alimento. Incluso la calidad de vida de anaquel del producto final es mejor que sin dicho tratamiento debido al aumento del azúcar. Generando una mejor textura y estabilidad del color durante el almacenamiento del producto. (Lombard, 2008).

El pre-tratamiento osmótico de un producto reduce la actividad del agua y la actividad enzimática con ligeros cambios en las características del producto (Giraldo et al., 2003). También disminuye el pardeamiento enzimático (Dermesonlouoglou et al., 2008). El secado convectivo con aire caliente se utiliza como medio para reducir el tiempo de procesamiento, eliminación de agua y mejorar las características sensoriales del producto. Además esta técnica permite conservar algunas características del producto inicial.

La sacarosa es considerada una de las mejores sustancias osmóticas especialmente cuando la deshidratación osmótica se emplea antes del secado. La presencia del azúcar en la superficie de la muestra deshidratada es un obstáculo para el oxígeno que está en contacto con la muestra (Lenart, 1996. Citado por: Castilho et al., 2007) reduciendo así las reacciones oxidativas (Castilho et al., 2007).

4.1.4. EL CARAMBOLO

El pertenece a la familia *Oxalidaceae* y es originaria de Asia Tropical. Actualmente esta fruta se encuentra presente en numerosos lugares de los trópicos y sub-trópicos, en países tales como: Australia, Brasil, China, Estados Unidos, Francia, Haití, Indochina, Malasia, México y Tailandia. (Nakasone y Paull, 1998; Villegas, 1998).

Los frutos son llamados comúnmente carambolas. Son elipsoides u ovoides con 5 costillas o prominencias longitudinales. El fruto es una baya con 4 - 5 celdas, de color amarillo translucido o dorado pálido, de 6 - 12 cm de largo por 3 - 6 cm de ancho un corte transversal da a la fruta una apariencia de estrella por lo que llamada comúnmente "fruta estrella". El fruto es de color amarillo con superficie de aspecto ceroso cuando está maduro, la pulpa es jugosa, ácida o dulce y contiene de 1 - 2 semillas colgantes cerca de la base, en cada celda. La carambola tiene varias aristas longitudinales que le dan además de su tamaño y color, alguna semejanza con la conocida papayuela. (Villegas, 1998).

Como es relativamente dura facilita su transporte. Crecen en racimos, ovaes o angulosos. Contiene una pulpa transparente acuosa, astringente cuando se encuentra en estado de maduración verde, pero gratamente ácido. Cuando se encuentra la fruta madura, su sabor es dulce, y tiene un perfume fuerte; comparado con el del membrillo. Su cascara es delgada y muy fina variando de un amarillo claro a oscuro. La cutícula es lisa y ceroso. La pulpa es translúcida de amarillo claro a más oscuro, crispada, sin fibra y muy jugosa. Variando en textura desde muy suave a firme y crispada. El sabor varía desde muy ácido con poco azúcar a muy dulce con poca acidez varía desde 2 - 10 mg de tejido; los sólidos varían desde 5-14 %. (Villegas, 1998).

En el ámbito mundial se reporta que la carambola es un fruto bajo en calorías, buena fuente de potasio y vitamina A, y una fuente moderada de vitamina C. Asimismo, se registra que las variedades extremadamente ácidas son ricas en ácido oxálico y que el fruto de carambola puede contener hasta 14 aminoácidos (Galán, 1991; Holman, 1998; Morton, 1987).

En la tabla 1 se registran los datos de las determinaciones bromatológicas y minerales del fruto de carambola ácida del piedemonte amazónico (Cubillos e Isaza, 1999).

Tabla 1: Características químicas del fruto de carambola ácida del piedemonte amazónico

Variable	Contenido		
Estado de madurez	Verde	Pintón	Maduro
Materia seca (%bs)	4.76	4.87	4.81
Proteína cruda (%bs)	7.04	7.47	7.28
Extracto etéreo (%bs)	1.82	2.32	2.511
ENN (%bs)	56.39	48.33	54.84
Fibra (%bs)	31.07	38.3	31.88
Cenizas (%bs)	3.7	3.57	3.5
Calcio* (mg/100 g de pulpa)	31.8 – 22.15	40.05 – 26.80	33.95 – 0.08
Hierro* (mg/100 g de pulpa)	3.7 – 0.24	2.7 – 0.20	2.85 – 0.24
Magnesio* (mg/100 g de pulpa)	94.2 – 13.45	92.15 – 12.55	84.25 – 11.70
Sodio* (mg/100 g de pulpa)	0.6 – 0.15	0.25 – 0.20	0.65 – 0.34
Cobre* (mg/100 g de pulpa)	0.32 – 0.19	0.35 – 0.05	0.5 – 0.08
Potasio* (mg/100 g de pulpa)	1170 – 104.8	1165 – 114.8	1080 – 120.2

* El primer valor corresponde a las determinaciones realizadas en cenizas y el segundo a las realizadas en jugo.

Fuente: Cubillos e Isaza, 1999.

El carambolo es rico en vitamina A y C. Por cada 100 g de la parte comestible se obtienen 90 mg Vitamina A, 0,04 mg tiamina (B), 0,02 Rivo flavina (B2) y 35 mg de ácido ascórbico. (Tello et al., 2002)

En Colombia el carambolo fue introducido en 1930 y la variedad *Icambola* fue desarrollada en 1972 por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA); los frutos de esta variedad son más grandes y con menor contenido de semillas, el sabor es ácido y presenta un aroma intenso y característico; se cultiva principalmente en la zona del bajo calima colombiano (Granados, 1993). El carambolo crece en las zonas selváticas, sin mucho viento y donde las temperaturas están por encima de los 25° C. (Ewa Kulak, 2007)

En Colombia, aunque no en grandes cultivos, se tiene una amplia distribución en los departamentos de Valle del Cauca, Córdoba, Antioquia, Caldas, Quindío y Tolima, y en la región de la Amazonía (Nakasone y Paull, 1998; Villegas, 1998)

En Colombia, dos veces al año (de enero a marzo y de agosto a octubre) podemos deleitarnos con una fruta bastante curiosa llamada carambolo o fruta estrella. (Ewa Kulak, 2007)

En un cultivo todos los árboles son productivos. Después de 5 años de producidos se tiene una producción de 100 libras por árbol, de 8-10 años los árboles producen 200-300 libras por árbol, de 12-13 años es de 300-400 la producción o más de fruta por año. (Villegas, 1998)

EMPAQUE

Los empaques utilizados hasta ahora han sido muy específicos de acuerdo con la forma y tamaño medio, siguen evolucionando por que los utilizados hasta ahora no han sido satisfactorios, por la excesiva separación entre frutos o por que no protege debidamente al fruto. (Villegas, 1998)

No existe hasta el momento un sistema estándar, es utilizado un empaque con una sola capa como en aguacates o duraznos, es empacada tendiendo el carambolo en ángulos y separada con lanillas de madera, o papel. Como el mercado todavía es un poco inestable es posible que pronto una o dos variedades desplazan a las otras y de esta manera aparezca un sistema más apropiado como se describía antes. La demanda a sido afectada muchas veces por que las alas del fruto llegan deterioradas al consumidor final. (Villegas, 1998)

Las nuevas envolturas en celofán retienen la temperatura interna de las cajas, evitando deshidratación, y conservando la temperatura constante unos 20°C y mejorando la apariencia una semana, el almacenamiento oscila entre 5°C y 10°C extendiendo la durabilidad postcosecha hasta tres semanas, que

se mejora refrigerando antes del transporte y protegiendo de la deshidratación. (Villegas, 1998)

El fruto de carambolo después de la post-cosecha debe ser manipulado cuidadosamente, ya que es muy susceptible a daños por golpes y roces. Se evidencian daños tales como: pardeamiento de las aristas, aparición de manchas superficiales de color café, agrietamiento de la corteza y aparición de hongos; asimismo, en frutos refrigerados se presenta disminución del aroma característico y alteración del color, observándose frutos de color café oscuro al final del almacenamiento. En el mercado se evitan productos blandos, manchados o excesivamente pardeados en los bordes (Holman, 1998; Nakasone et al., 1998).

4.2. ANTECEDENTES

En la literatura científica se evidencian algunos trabajos de la aplicación combinada de la DO y secado convectivo con resultados positivos en la calidad del producto seco:

Muestras de manzana previamente deshidratadas osmóticamente con concentraciones de sacarosa 30 y 45 % w/w se secaron con aire caliente a 55°C. Los resultados mostraron que las muestras pre-tratadas osmóticamente a 45 % w/w presentaron mayor porosidad, un incremento de la firmeza durante el secado, mayor retención del color durante el secado. (Mandala et al., 2005)

Las bayas de arándano con pretratamiento osmótico y secas con aire caliente a baja temperatura presentan alta calidad de la baya seca. Como era de esperar, el deterioro gradual de la mayor parte de los parámetros de calidad se observó, con una excepción para el sabor. En efecto el sabor de

las bayas se ha mejorado después de cada paso de la tecnología híbrida, especialmente para los arándanos. (Grabowski et al., 2007).

Giraldo *et al.*, (2004), Investigaron la técnica de osmo-secado convectivo sobre características sensoriales en mora de castilla utilizando previamente tres jarabes con igual concentración (70 °Brix): sacarosa, sacarosa invertida y miel de caña. El secado convectivo se realizó a 55 °C con un caudal de $1,5\text{ms}^{-1}$. Los investigadores concluyeron que la deshidratación osmótica aplicada a la mora de castilla para los tres jarabes utilizados, mostró buena retención de las características sensoriales de la fruta (color, olor y sabor).

Papaya previamente deshidratadas con tratamiento osmótico con concentraciones de sacarosa 70 % w/w se secaron con aire caliente a temperatura de 40 y 60 °C mostraron incremento en la resistencia interna al movimiento del agua, causado principalmente por el encogimiento y la absorción de sólidos durante el pre-tratamiento osmótico. (El-Aouar et al., 2003)

5. MATERIALES Y METODOS

5.1. MATERIA PRIMA

5.1.1. FRUTA

Se utilizaron frutos de carambolo del mismo proveedor de (*Averrhoa carambola* L.) que fueron cultivados en el municipio de Ginebra Valle del Cauca y adquiridos en un mercado local de la ciudad de Santiago de Cali (Fig. 1).



Figura 1: Carambolo (*Averrhoa carambola* L)

Los frutos se seleccionaron teniendo en cuenta su estado de madurez 5 (°Brix de 6,0 a 8,0) de acuerdo a la tabla de color (Fig. 2) establecida por García y Mejía (2004).

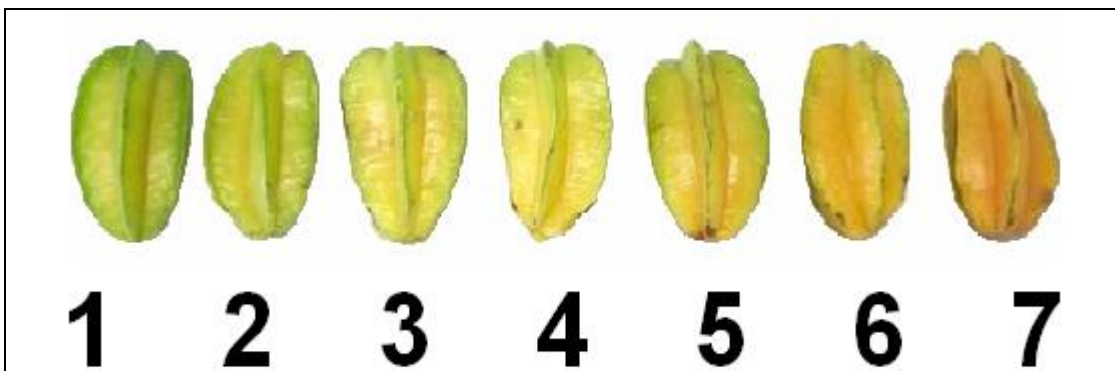


Figura 2: Tabla de color carambolo (*Averrhoa carambola* L) (García y Mejía, 2004).

5.1.2. PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Las frutas se cortaron manualmente en rodajas de sección circular de 3 mm de altura y 30 mm de diámetro (Fig. 3), para ello se usó una cortadora manual y un sacabocados en acero inoxidable para alimentos.



a

Figura 3: (a) Láminas de sección circular de carambolo.

De cada fruto se obtuvieron entre 6 a 7 rodajas. Las muestras fueron escaldadas a 90 °C por 1 min, para evitar pardeamiento enzimático.

5.1.3. PREPARACIÓN DE LA SOLUCIÓN OSMÓTICA

Para seleccionar una concentración de sacarosa previo al secado convectivo de muestras de carambolo se realizaron tres deshidrataciones osmóticas a 45, 55 y 65°Brix. Para determinar la mejor concentración se tuvo como criterio el que deshidrate las muestras a menor contenido de humedad (CH) para un mismo tiempo de DO. Se prepararon 5600 ml de solución osmótica (SO) en agua destilada con sacarosa comercial. La SO se preparó en un recipiente plástico de forma cilíndrica de 10 litros de volumen. El recipiente se sumergió en un baño maría para mantener una

temperatura constante de 28°C. La SO se agitó a 1000 r.p.m. mediante un agitador mecánico (Kika LaborTechnik Pol Co) para facilitar la solubilidad del azúcar.

5.2. PROCEDIMIENTO

5.2.1. PROCESO DE DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA

Las rodajas de carambolo se sumergieron en las SO a 28 °C con una relación fruta-sacarosa de 1:15 para minimizar los cambios de concentración de la solución osmótica durante el proceso. Esta relación es ampliamente utilizada en la literatura científica (Castilho et al., 2007, Castelló et al., 2010). La SO durante la DO se agitó a 1000 r.p.m. mediante un agitador mecánico (Kika LaborTechnik Pol Co) para evitar el efecto de formación de costra del azúcar en la superficie de las muestras y acelerar el proceso de deshidratación.

A diferentes tiempos de DO (de acuerdo a la tabla 2 del diseño de experimentos) se extrajeron muestras de la SO para determinar el contenido de humedad (CH), actividad de agua (a_w), densidad aparente (ρ_a), porosidad (ϵ), Volumen (V) y color (L, a y b). Estas medidas corresponden a los valores iniciales de las muestras que fueron secadas con aire caliente (osmosecado).

5.2.2. SECADO CONVECTIVO CON AIRE CALIENTE

Las muestras deshidratadas osmóticamente y las frescas se sometieron a secado convectivo con aire caliente entre 50 a 70 °C (de acuerdo al diseño experimental central compuesto rotatable de la Tabla 2) y un flujo de aire de 0.90 m/s, para ello se empleó un secador de túnel (Armfield, USA.) figura 4. A diferentes tiempos de secado se determinó CH, a_w , ρ_a , ϵ , V y color (coordenadas L, a y b).



Figura 4: Túnel de Secado con aire caliente.

5.3. DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se utilizó un diseño experimental central compuesto rotatable (DCCR) con tres niveles en cada factor: Tiempo de DO (60,100 y 140 min) y Temperatura de secado (55, 60 y 65 °C), ambos factores con $\alpha \pm 2$, con cinco repeticiones del punto central y dos repeticiones de las restantes combinaciones para un total de 21 corridas (Tabla 2).

Las variables de respuesta fueron: humedad, actividad de agua, densidad aparente, porosidad, volumen y color (ΔE).

Tabla 2: Matriz de diseño correspondiente al DCCR codificada.

Tratamiento	Repet	TDO	TS	TDO	TS
1	1	-1	-1	60	55
2	1	-1	1	60	65
3	1	1	-1	140	55
4	1	1	1	140	65
5	1	-2	0	20	60
6	1	2	0	180	60
7	1	0	-2	100	50
8	1	0	2	100	70
9	1	0	0	100	60
9	1	0	0	100	60
9	1	0	0	100	60
9	1	0	0	100	60
9	1	0	0	100	60
1	2	-1	-1	60	55
2	2	-1	1	60	65
3	2	1	-1	140	55
4	2	1	1	140	65
5	2	-2	0	20	60
6	2	2	0	180	60
7	2	0	-2	100	50
8	2	0	2	100	70

TDO: Tiempo de deshidratación osmótica; TS: Temperatura secado

Se empleó la metodología de superficie de respuesta para estimar los parámetros del modelo de segundo orden, con las variables de proceso X_1 (Temperatura de secado) y X_2 (Tiempo de DO) y Y_i para cada variables de respuesta medidas en

los puntos críticos del tiempo de secado (60, 120 y 180 min), tal como se indica en la figura 5.

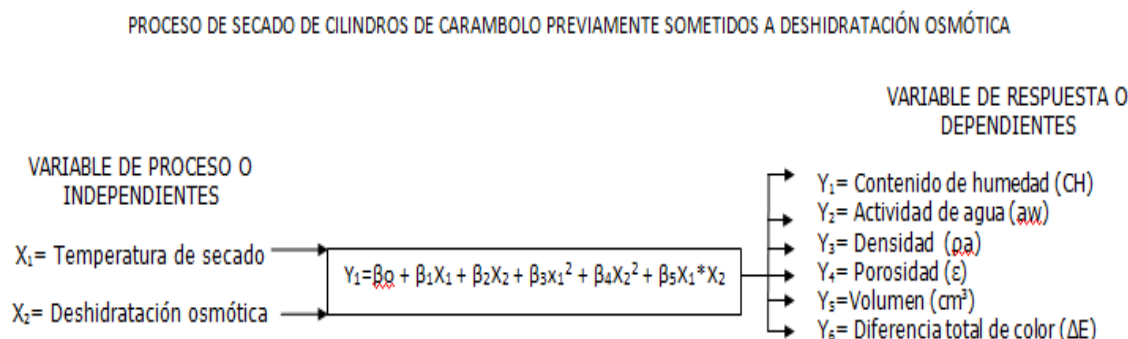


Figura 5: Modelo matemático para el proceso de secado para placa infinita de sección circular de carambolo previamente sometidos a DO.

Una vez ajustado el modelo de superficie de respuesta, se evaluó su bondad de ajuste (R^2) y la significancia de sus componentes (lineal, cuadrático e interacción), lo mismo que la significancia de los parámetros estimados. La información se procesó con el programa estadístico minitab 15.

Se evaluó la pérdida del contenido de humedad para las variables de proceso X_1 y X_2 (Figura 5), Se encontró que el tiempo de deshidratación osmótica adecuado fue 100 min y la temperaturas de secado convectivo con aire caliente estuvo entre 60-65 °C. (ANEXOS B). Por tanto se planteó dos matrices de respuestas según la matriz de diseño correspondiente al DCCR para optimizar el proceso. La información se procesó con el programa estadístico minitab 15.

Se evaluó la primera matriz de respuesta (Tabla 3), donde se empleó la metodología de superficie de respuesta para estimar los parámetros del modelo de segundo orden, con las variables de proceso X_3 (Temperatura de secado convectivo) y X_4 (Tiempo de secado) y Y_i para cada variables de respuesta medidas a 100 min de DO como se indica en la Figura 6.

Tabla 3: Matriz de respuesta según diseño de tratamientos DCCR empleando como tiempo de DO 100 min

Tratamiento	Repet	T (°C)	t. (min)	T (°C)	t. (min)
1	1	-1	-1	50	60
2	1	1	-1	70	60
3	1	-1	1	50	180
4	1	1	1	70	180
5	1	-1	0	50	120
6	1	1	0	70	120
7	1	0	-1	60	60
8	1	0	1	60	180
9	1	0	0	60	120
10	1	0	0	60	120
11	1	0	0	60	120
12	1	0	0	60	120
13	1	0	0	60	120

T: Temperatura de secado; t: tiempo de secado

PROCESO DE SECADO DE CILINDROS DE CARAMBOLO PREVIAMENTE SOMETIDOS A DESHIDRATACIÓN OSMÓTICA

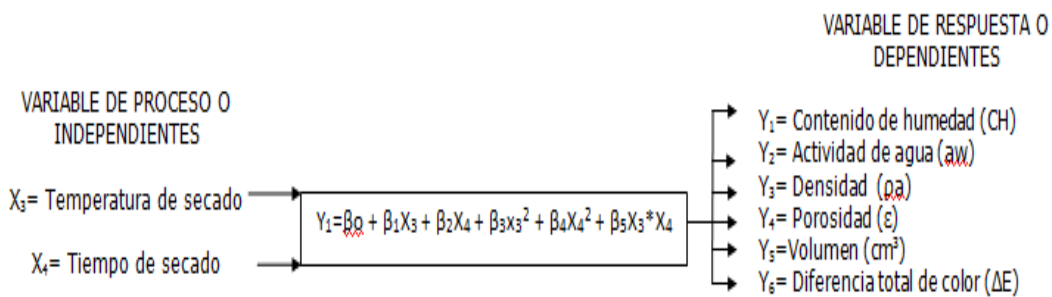


Figura 6: Modelo matemático para el proceso de secado para placa infinita de sección circular de carambolo previamente sometidos a 100 min de deshidratación osmótica.

Se evaluó la segunda matriz de respuesta (Tabla 4), donde se empleó la metodología de superficie de respuesta para estimar los parámetros del modelo de segundo orden, con las variables de proceso X_5 (Tiempo de deshidratación osmótica) y X_6 (Tiempo de secado) y Y_i para cada variables de respuesta

medidas entre 60 – 65 °C de temperatura de secado, como se indica en la Figura 7.

Tabla 4: Matriz de respuesta según diseño de tratamientos DCCR entre 60-65 °C de temperatura

Tratamiento	Repet	t DO (min)	t (min)	t DO (min)	t (min)
1	1	-1	-1	60	60
2	1	1	-1	60	180
3	1	-1	1	140	60
4	1	1	1	140	180
5	1	-1	0	100	60
6	1	1	0	100	180
7	1	0	-1	60	120
8	1	0	1	140	120
9	1	0	0	100	120
10	1	0	0	100	120
11	1	0	0	100	120
12	1	0	0	100	120
13	1	0	0	100	120

tDO: tiempo de deshidratación osmótica; t: tiempo de secado

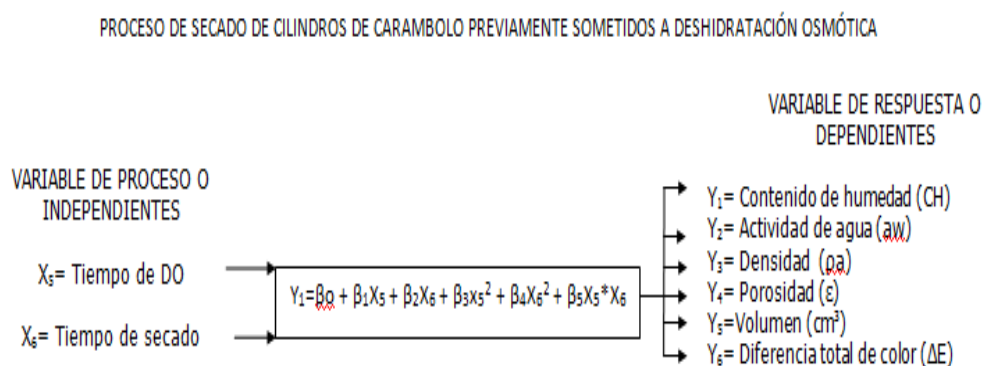


Figura 7: Modelo matemático para el proceso de secado para placa infinita de sección circular de carambolo previamente sometidos a deshidratación osmótica y secados convectivamente entre 60 y 65 °C.

La siguiente etapa del análisis, se centró en realizar cinéticas de secado, definidas en términos del CH del producto en función del tiempo de secado (0, 15, 30, 60, 120, 180, 240, 300 min). A través de las cinéticas se determinaron los mejores

tiempos de secado donde se observó la mayor pérdida de humedad para aplicar el modelo de superficies de respuesta a los tres tiempos de secado para determinar las variables de proceso.

6.4. DIAGRAMA DEL PROCESO DE SECADO.

En la figura 8. Se ilustran cada una de las etapas seguidas en el proceso de secado de carambolo

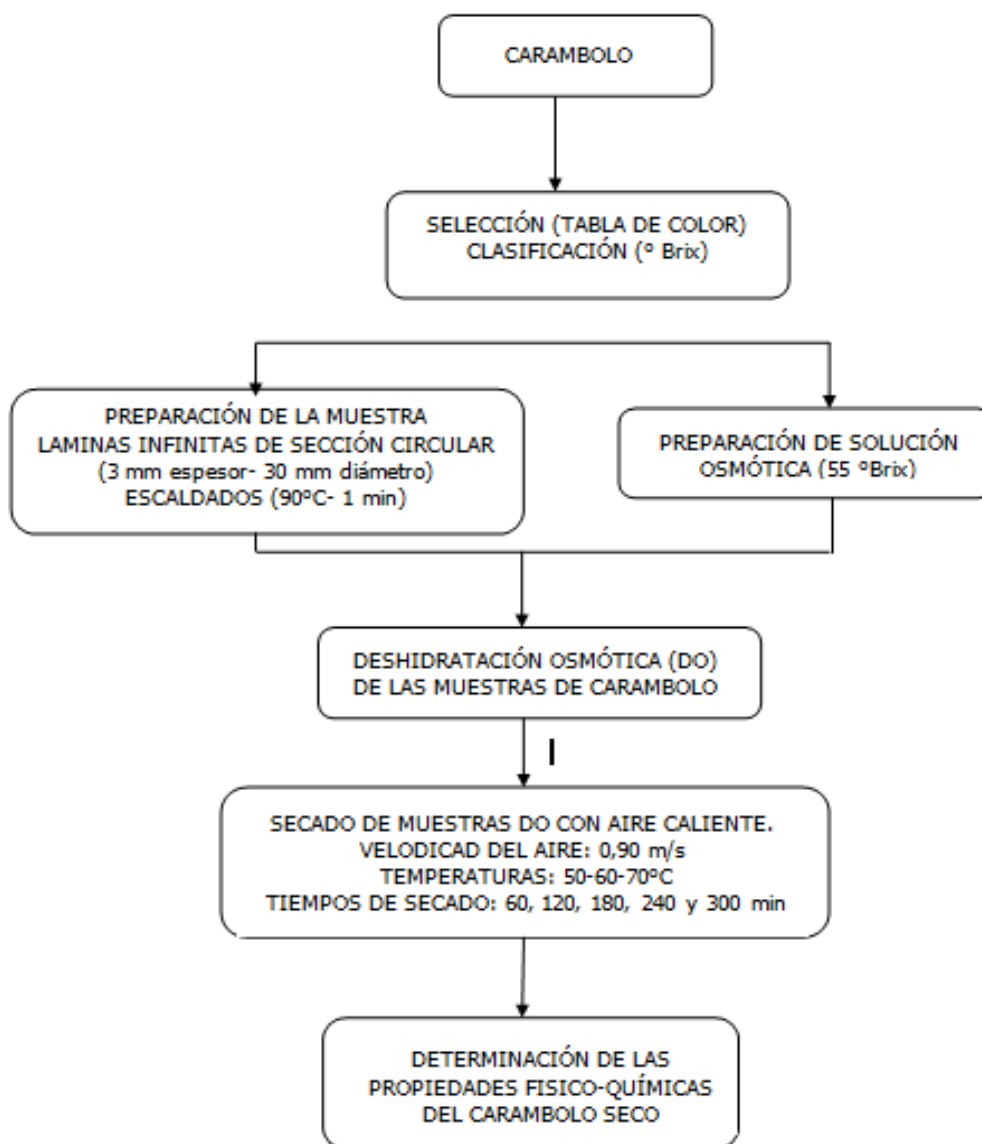


Figura 8: Proceso experimental para el secado de carambolo previamente sometidos a deshidratación osmótica.

5.4. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICO – QUÍMICAS

5.4.2. CONTENIDO DE HUMEDAD

El CH se determinó en estufa de acuerdo al método 934,04 AOAC (1996).

El peso de las muestras antes y después del secado se midió mediante una balanza analítica (Accualab sartorius group) con una precisión 0,0001.

El CH se determinó mediante la ecuación 1.

$$CH = \frac{M_o - m_f}{M_o} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

M_o : masa inicial de la muestra

m_f : masa de la muestra en un tiempo (min)

5.4.3. ACTIVIDAD DE AGUA:

La variación de la a_w para las muestras en cada tiempo de secado se midió con un higrómetro de punto de rocío a 25 ° C (AquaLab Series 4DUO de Decagon USA) con una precisión 0,001.

5.4.4. DENSIDAD APARENTE

La ρ_a se determinó por el método de desplazamiento de volumen utilizando un picnómetro (10 ml); como líquido de referencia se empleó agua destilada a 25°C. La ρ_a (g/cm³) se calculó con la ecuación 2. (Mosquera E. 2009).

$$\rho_a = \left(\frac{P_1}{P_2 + P_1 - P_3} \right) \rho_{H_2O} \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

P_1 : Peso de la muestra (g)
 P_2 : Peso del picnómetro aforado con agua destilada (g)
 P_3 : Peso del picnómetro con la muestra y aforado con agua destilada (g)
 ρ_{H_2O} : Densidad del agua (g/cm³)

5.4.5. POROSIDAD:

La porosidad de las muestras de carambolo se calculó mediante la relación de la densidad aparente y densidad real (Ecuación 3) (Ayala et al., 2009)

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_r} \right) * 100 \quad \text{Ec. 3}$$

La densidad real (ρ_r) se calculó con la ecuación 4. (Ayala et al., 2009)

$$\rho_r = \frac{1}{\frac{X_w}{1000} + \frac{1}{1590}} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

X_w : Contenido de humedad en fracción másica

5.4.6. VARIACIÓN DE VOLUMEN

El Volumen de las muestras se determinó mediante la densidad aparente y el peso de la muestra. El cambio de volumen se calculó con la ecuación 5 (Ayala et al., 2010)

$$\Delta V = \left(\frac{V_t - V_o}{V_o} \right) * 100 \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

V_o : Volumen inicial de la muestra (cm^3)

V_t : Volumen de la muestra en un tiempo t (cm^3)

5.4.7. COLOR

Se utilizó un colorímetro (Hunter Lab) para la estimación del color de los cilindros de carambolo para cada tiempo de secado. Las mediciones se llevarán a cabo utilizando la escala CIELab para obtener las coordenadas de color L^* , a^* y b^* de la fruta. Con estas coordenadas se estimó el cambio de color (ΔE), la coordenada psicométrica croma (C^*_{ab}) y el ángulo del tono métrico (H) con las ecuaciones 6, 7 y 8 respectivamente. (Chong et al., 2008)

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad \text{Ec. 6}$$

5.4.8. COEFICIENTE DE DIFUSIÓN EFECTIVA

El coeficiente de difusión efectivo (D_{eff}) se determinó aplicando una solución analítica de la segunda ley de Fick para tiempos largos (Crank 1975) para una geometría de placa infinita de sección circular. (Ecuación 9), y asumiendo que: (1) el contenido de humedad inicial era uniforme en la rodaja de carambolo; (2) la geometría de la rodaja de carambolo permanecía constante durante el proceso de secado (Crank 1975). (Ochoa et al., 2005)

$$\frac{\bar{X} - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-(2n+1)^2 \pi^2 D \frac{t}{4L^2} \right] \quad \text{Ec 9}$$

Donde:

X: Humedad en un tiempo
 Xe: Humedad en equilibrio
 Xo: Humedad inicial
 D : coeficiente de difusión
 L : Mitad del espesor de la muestra
 t : Tiempo de secado convectivo

La ecuación 9 se resolvió mediante el uso “solver” de Microsoft Excel con el fin de determinar el coeficiente de difusividad a diferentes temperaturas de secado.

5.4.9. ENERGÍA DE ACTIVACIÓN

La energía de activación Ea, se estimó usando la ecuación tipo Arrhenius (Ecuación 10) (Ochoa et al., 2005)

$$\overline{D_{eff}} = D_o \exp \left[-\frac{E_a}{RT} \right] \quad \text{Ec 10}$$

Donde:

Ea: Energía de activación del proceso de secado (kJ.mol⁻¹)
 Do: Factor de Arrhenius (m².s⁻¹)
 R : Constante general de los gases (8,314 x 10⁻³ kJ.mol⁻¹.K⁻¹)
 T : Temperatura absoluto (°K)

6. RESULTADOS Y ANALISIS

6.1. DESHIDRATACIÓN OSMOTICA COMO PRETRATAMIENTO AL SECADO CONVECTIVO

Para definir una concentración de sacarosa y un tiempo de deshidratación osmotica (TDO) previo al proceso de secado de las muestras de carambolo, se realizaron tres deshidrataciones osmóticas a 45, 55 y 65°Brix (Figura 9). Las muestras de carambolo frescos presentaron un CH inicial entre 0,89 -0,90 Kg agua/kg mh (Anexo A). Se nota la rápida pérdida de humedad en las tres concentraciones antes de 120 min, pero en este mismo periodo el ANOVA no evidenció diferencias significativas ($p>0.05$) del CH entre los tratamientos. De acuerdo a estos resultados se decidió seleccionar la concentración promedio de 55°Brix como pre-tratamiento al secado osmo-convectivo.

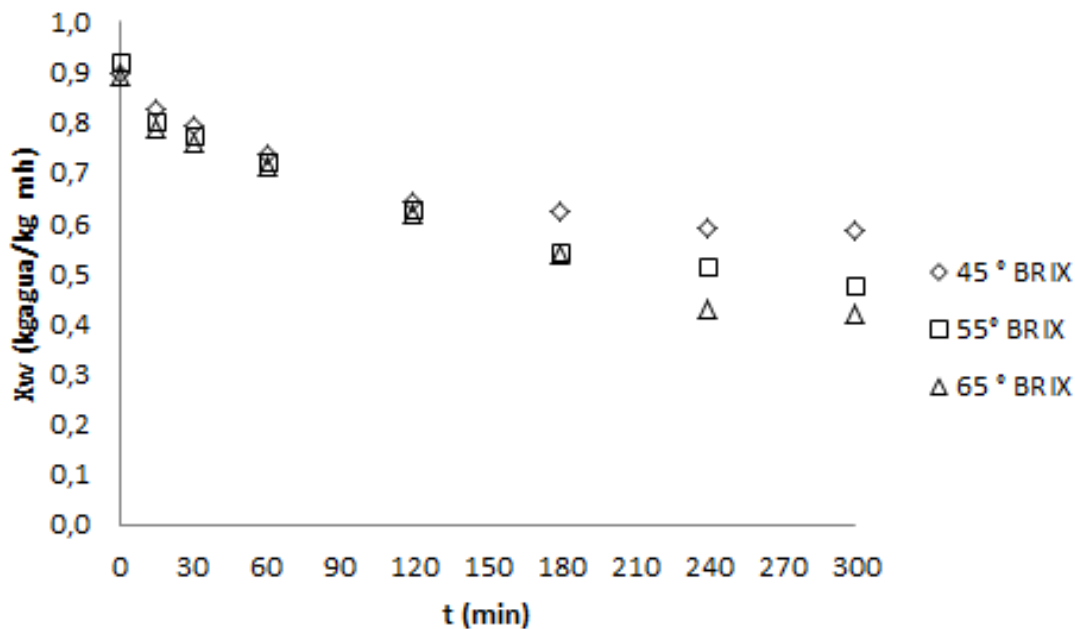


Figura 9: Cinética de deshidratación osmótica de carambolo a 45, 55 y 65 °Brix y temperatura.

6.2. CURVAS DEL SECADO DE MUESTRAS FRESCAS Y DESHIDRATAS OSMOTICAMENTE

Las cinéticas de secado convectivo de muestras de carambolo se realizaron a 50 60 y 70 °C, estas temperaturas son usuales para el secado de frutas (Castilho et al., 2007, Moreira et al., 2009 y Chong et al, 2008).

La figura 10 muestra las curvas de secado convectivo con aire caliente de rodajas de carambolo fresco (SC) y el secado osmoconvectivo (SOC) de muestras previamente deshidratadas osmoticamente a 100 min.

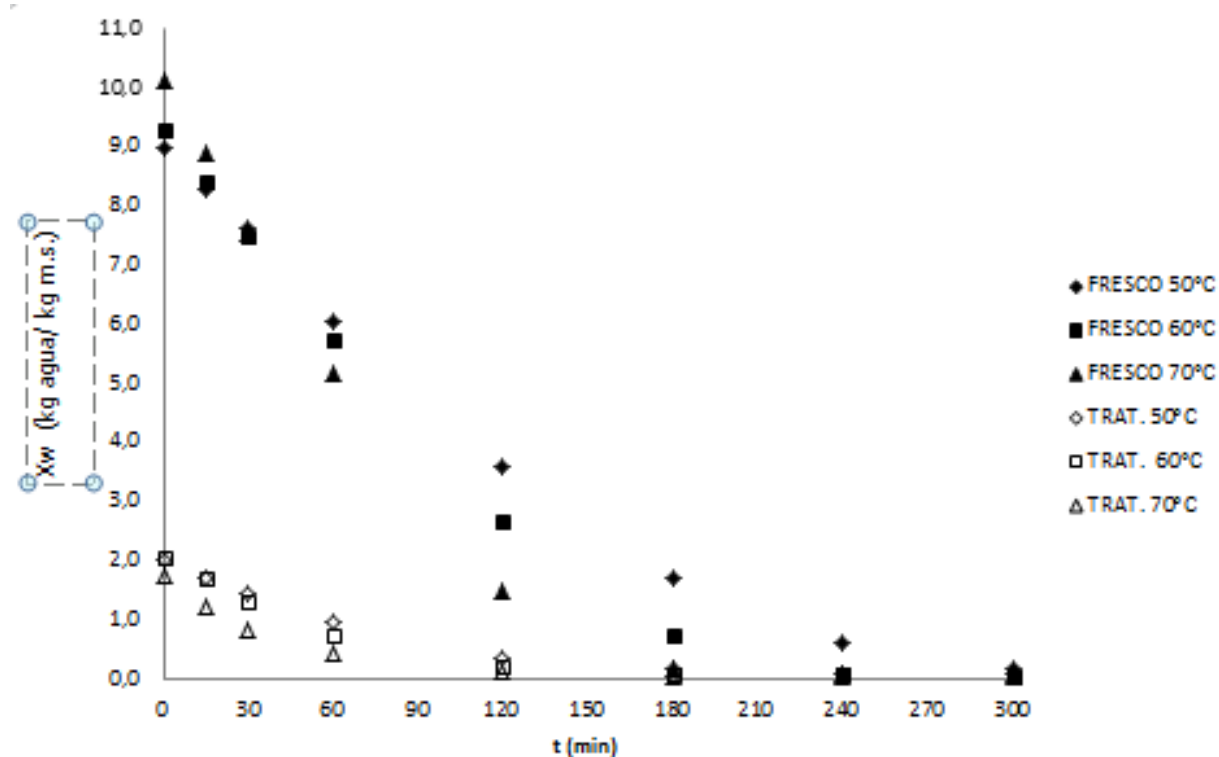


Figura 10: Curvas de secado de carambolo fresco y deshidratadas osmoticamente a 100 min a 55 °Brix.

El CH Inicial del carambolo fresco fue $9,5568 \pm 0,7800$ kg agua/kg ms y las deshidratadas osmoticamente antes del secado fue $1,8863 \pm 0,1800$ kg agua/kg ms. Es evidente en todos los tratamientos la disminución del CH durante el tiempo

de secado, notándose que los tratamientos de SOC presentaron las mayores pérdidas de humedad para un mismo tiempo de secado; a los 120 min alcanzaron entre 0,1 y 0,4 kg agua/kg ms, mientras que los tratamientos SC variaron entre 1.8 y 3.8 kg agua/kg ms. Esto indica la mayor pérdida de agua con la aplicación de un tratamiento osmótico previo al secado convectivo. Se observó que a mayor temperatura de secado mayor fue la pérdida de humedad de las muestras, este comportamiento se observó en el secado pulpa de cupuaçu (Giraldo et al., 2010).

6.3. ANALISIS DE SUPERFICIE DE RESPUESTA

6.3.1. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA Y EL TIEMPO DE SECADO CON AIRE CALIENTE SOBRE LA PÉRDIDA DE HUMEDAD Y PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE MUESTRAS DE CARAMBOLO DESHIDRATADOS OSMOTICAMENTE A 100 MIN.

De acuerdo al diseño de experimentos, se analizaron las pérdidas de humedad y propiedades fisicoquímicas (Actividad de agua, densidad aparente, porosidad, cambio de volumen y color (ΔE)) de muestras de carambolo osmosecadas. El parámetro constante fue el tiempo de DO de 100 min a 55 °Brix y las variables de proceso fueron temperatura de secado (50, 60 y 70°C.) y tiempo de secado (min).

Se obtuvo una matriz de respuesta de la influencia de la temperatura y el tiempo de secado convectivo sobre la pérdida de humedad y propiedades fisicoquímicas de muestras DO. (Tabla 5)

Tabla 5: Matriz de respuesta según diseño de tratamientos DCCR.

Tratamiento	Repet	T (°C)	t. (min)	T (°C)	t. (min)	ΔX	a_w	Pa (g/cm ³)	ε (%)	ΔV (%)	ΔE
1	1	-1	-1	50	60	0,5304	0,91	0,8469	20,70	-34,69	1,63
2	1	1	-1	70	60	0,7752	0,82	0,9386	31,07	-34,30	2,07
3	1	-1	1	50	180	0,9266	0,50	0,8811	23,26	-55,89	2,57
4	1	1	1	70	180	0,9704	0,49	0,9115	40,88	-57,68	3,02
5	1	-1	0	50	120	0,8771	0,72	0,8548	22,25	-48,14	2,09
6	1	1	0	70	120	0,9278	0,58	0,9440	36,63	-53,40	2,72
7	1	0	-1	60	60	0,6339	0,91	0,9614	24,22	-38,03	1,58
8	1	0	1	60	180	0,9546	0,52	0,9432	37,76	-60,68	2,19
9	1	0	0	60	120	0,9082	0,66	0,9367	35,29	-58,75	2,03
10	1	0	0	60	120	0,9137	0,69	0,9672	33,25	-61,59	1,98
11	1	0	0	60	120	0,9016	0,71	0,9749	32,80	-52,18	1,54
12	1	0	0	60	120	0,8939	0,59	0,9590	33,98	-44,53	2,29
13	1	0	0	60	120	0,8929	0,84	0,9561	33,39	-48,53	2,09

T: Temperatura de secado; t: tiempo de secado

7.3.1.1. COEFICIENTE DE DIFUSIÓN EFECTIVA DE AGUA (D_{eff})

Los valores del coeficiente de difusión efectiva (D_{eff}), para carambolos sin tratamiento y con tratamiento a diferentes temperaturas se presentan en la tabla 6. Los valores de D_{eff} variaron en carambolos sin tratamiento de $4,23 \times 10^{-10}$ (50 °C) a $5,58 \times 10^{-10}$ m²/s (70 °C). En carambolos con tratamiento osmótico los valores de D_{eff} variaron de $2,94 \times 10^{-10}$ (50 °C) a $3,20 \times 10^{-10}$ m²/s (70 °C). Los valores se encuentran dentro del rango general de 10^{-11} m²/s a 10^{-9} m²/s de productos alimenticios (Madamba et al., 1996). Se puede observar que los valores de D_{eff} aumentan considerablemente al aumentar la temperatura para los carambolos sin y con tratamiento. Resultados similares fueron obtenidos en el secado de granos verdes (Doymaz I, 2006) y en mora (Maskan et al., 1998). El aumento de la difusividad al aumentar la temperatura puede ser dado por la destrucción de las paredes celulares, disminuyendo la resistencia a la difusión del agua dentro del alimento (Maskan et al., 1998).

Tabla 6: Coeficiente de difusión efectiva de agua para carambolo fresco y con tratamiento (Secado osmo-convectivo) durante el secado convectivo con aire caliente a velocidad de aire constante.

		Carambolo sin tratamiento		Carambolo con tratamiento (secado osmo-secado)	
TEMPERATURA (°C)	VELOCIDAD DEL AIRE (m/s)	De x 10 ⁻¹⁰ (m ² /s)	R ²	De x 10 ⁻¹⁰ (m ² /s)	R ²
50	0,90	4,23	0,9011	2,94	0,9838
60	0,90	4,97	0,9076	3,13	0,9928
70	0,90	5,58	0,9473	3,20	0,9513

Los carambolos sin tratamiento presentaron mayores valores de D_{eff} que las muestras tratadas (Secado osmo-convectivo). Este comportamiento puede explicarse posiblemente por el mayor volumen de las muestras frescas, presentando mayor area superficial para la difusión del agua. La deshidratación osmótica como pretratamiento del secado convectivo con aire caliente disminuye el volumen de las muestras. Resultados similares se encontraron en pera (Park et al., 2002), (Simal et al., 1997). y piña (Rahaman y Lamb, 1991). Además los valores más bajos de D_{eff} se deben a los cambios en la estructura celular que se producen durante la deshidratación osmótica, esto hace que se genere reducción en la transferencia de masa (González et al., 2006).

7.3.1.2. ENERGÍA DE ACTIVACIÓN (E_a)

Los valores de la energía de activación (E_a), para carambolos sin y con tratamiento se presentan en la tabla 7. El valor de E_a de los carambolos con y sin tratamiento osmótico fue 3,79 kJ.mol⁻¹ y 12,76 kJ.mol⁻¹ respectivamente. Es evidente la disminución de la E_a en las muestras con pretratamiento osmótico. El alto valor de E_a en la muestras sin tratamiento puede explicarse al alto CH inicial de los carambolos entre 8,9986 y 10,1150 kg agua/kg ms, en comparación con el CH después de la deshidratación osmótica entre 1,7531 y 2,0195 kg agua/kg

ms. Estos resultados significan que las muestras de carambolo sin tratamiento osmótico necesitan mayor energía térmica para eliminar el agua durante el secado. Resultados similares se encontraron en zanahoria (Bahadur S, 2007).

Tabla 7: Energía de activación para carambolo fresco y con tratamiento (Secado osmo-convectivo) durante el secado convectivo con aire caliente a velocidad de aire constante.

	CARAMBOLO SIN TRATAMIENTO		CARAMBOLO CON TRATAMIENTO (SECADO OSMO-CONVETIVO)	
VELOCIDAD DEL AIRE (m/s)	Ea (KJ.mol ⁻¹)	R ²	Ea (KJ.mol ⁻¹)	R ²
0,90	12,76	0,9944	3,74	0,9473

Se determinó el análisis de varianza (ANOVA) para la pérdida de humedad y las propiedades físico-químicas. En el secado osmoconvectivo de carambolo previamente DO a 100 min a 55 °Brix. (Tabla 8)

Tabla 8: Análisis de varianza (ANOVA) de los parámetros de regresión para el modelo de superficie de respuesta, para el secado osmo-convectivo de carambolo previamente DO a 100 min a 55

	gl	ΔX	a_w	$\rho_a(\text{g/cm}^3)$	ε (%)	ΔV (%)	ΔE
Regresión	5	0.202**	0.229**	0,020**	478,99**	887,0	1,948*
Lineal	2	0.157**	0.222 ns	0,007**	411,04*	760,70	1,426*
Cuadrático	2	0.034**	0.004ns	0,012**	54,79**	125,11	0,522*
Interacción	1	0.010*	0.001 ns	0,0009*	13,15 ns	1,19	0,983 ns
Error		0.0003	0.034	0,0008	0,9307	0,911	0,3041
R ² (%)		98.31	85,64	94,25	94,96	81,05	84,66

*Significativo al nivel de ≤ 0.05 ; **Altamente significativo al nivel de ≤ 0.01 ; ns No significativo

Según el modelo matemático de superficie de respuesta de segundo orden se realizó la regresión de los parámetros para la pérdida de humedad y las

propiedades físico-químicas. En el secado osmoconvectivo de carambolo previamente DO a 100 min a 55 °Brix. (Tabla 9)

Tabla 9: Regresión modelo matemático de superficie de respuesta de segundo orden, según diseño de los tratamientos

FUENTE DE VARIACIÓN	ΔX	a_w	$\rho a(g/cm^3)$	$\varepsilon (\%)$	$\Delta V (\%)$	ΔE
β_0	-0.645 ns	0,143 ns	-1.565**	-117.56*	-53,304	14,69**
$\beta_1 X_3$	0.011 ns	0,042 ns	0.076**	4.182*	-1,110 ns	-0,4887*
$\beta_2 X_4$	0.014**	-0,0066 ns	0.001 ns	0.0000 ns	-11,205 **	0,0128 ns
$\beta_3 X_3^2$	0.00003 ns	-0,0041 ns	-0.0005**	-0.032*	3.006 ns	0,0043**
$\beta_4 X_4^2$	-0.00002 **	0,000006 ns	-0.0000 ns	-0.000 ns	4,421 ns	-0,0000 ns
$\beta_5 X_3 * X_4$	-0.00008*	0,00003 ns	-0.00003*	0.0003 ns	- 0,545 ns	0,0000 ns

*Significativo al nivel de ≤ 0.05 ; **Altamente significativo al nivel de ≤ 0.01 ; ns No significativa

7.3.1.3. CONTENIDO DE HUMEDAD

Se aplicó un modelo de superficie de respuesta de segundo orden (Ec. 11) de la forma:

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 X_3 + \beta_2 X_4 + \beta_3 X_3^2 + \beta_4 X_4^2 + \beta_5 X_3 * X_4 \quad \text{Ec.11}$$

Por medio del análisis de varianza (ANOVA) se evidenciaron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en el modelo aplicado. De acuerdo a la Tabla 8 el coeficiente de determinación R^2 fue 98,31%, por consiguiente, es apropiado para evaluar la influencia de las variables de proceso temperatura de secado (X_3) y tiempo de secado (X_4) sobre las variables respuesta ya mencionadas (Tabla 9).

Se aplicó el modelo de superficie de respuesta de segundo orden a la pérdida de humedad. (Ec 12)

$$Y_1 = -0.645 + 0.011X_3 + 0.014X_4 + 0.00003X_3^2 - 0.00002X_4^2 - 0.00008X_3 \cdot X_4 \quad \text{EC. 12}$$

El significado de cada coeficiente y sus interacciones se determinó mediante la prueba t (valor t). En el análisis de varianza, (Tabla 8), se evidenció que los términos lineales, cuadráticos del tiempo de secado fueron significativos ($P \leq 0.05$) con la pérdida de humedad. De igual forma la interacción entre tiempo de secado y temperatura. Por tanto la La pérdida de la humedad de las muestras depende del tiempo de secado y de la interacción temperatura y tiempo de secado.

La Figura 11 muestra la interacción de los efectos de la temperatura de secado y el tiempo de secado sobre la pérdida de humedad de carambolos sometidos a 100 min de deshidratación osmótica. De acuerdo al modelo estimado se puede afirmar que las variables temperatura de secado y tiempo de secado están interactuando en el proceso de secado del carambolo permitiendo la pérdida de humedad del producto, cuando se aumenta la temperatura y el tiempo de secado. Este comportamiento se puede observar también en la gráfica de contorno de la figura 10. Se aprecia que al aumentar la temperatura de secado de 60 a 65°C, y tiempo de secado convectivo de 100 a 120 min se aumenta la pérdida de humedad $\geq 0,8$ kg agua/kg ms. A tiempos de secado de 140 min y a cualquier temperatura se aumenta la pérdida de humedad $\geq 0,9$ kg agua/kg ms.

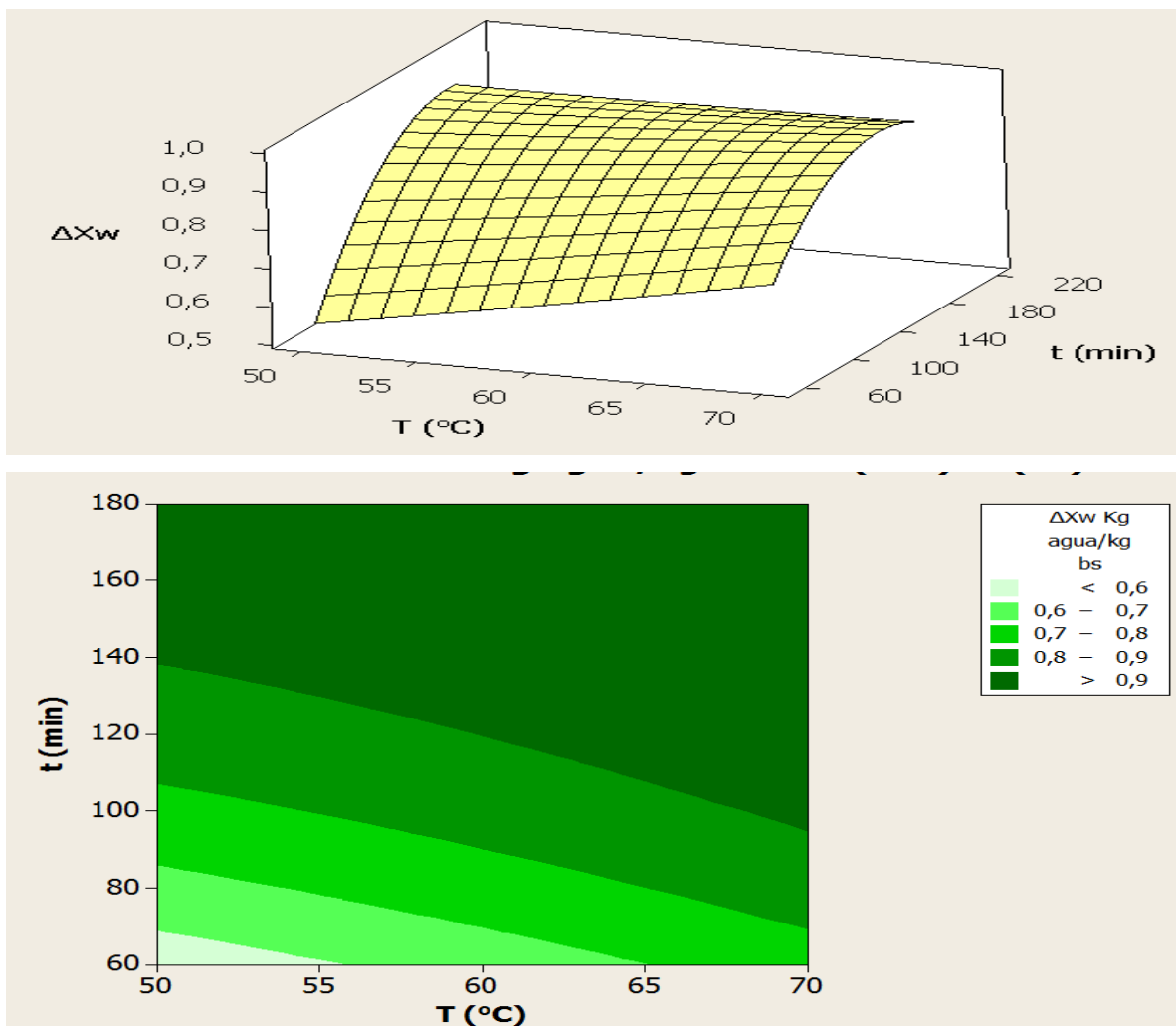


Figura 11: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto de la temperatura de secado y el tiempo de secado sobre la pérdida de humedad de carambolos sometidos a 100 min de deshidratación osmótica.

Esos resultados indican que las muestras de carambolo secados por convección con aire caliente requieren tiempos de secados cortos a temperatura entre 60 - 65 $^{\circ}\text{C}$ para obtener mayor pérdida de humedad a rangos $\geq 0,8$ kg agua/kg ms.

7.3.1.4. ACTIVIDAD DE AGUA (a_w)

Por medio del análisis de varianza (ANOVA), se determinó que no existen diferencias significativas ($p \geq 0,05$) en el modelo aplicado (Tabla 8). Por tanto este no es apropiado para explicar la relación funcional entre la actividad de agua de

los carambolos y las variables predictoras, temperatura de secado (X_3), y tiempo de secado (X_4) (Tabla 9). El coeficiente de determinación R^2 86,28 %, fue adecuado porque los valores de R^2 fueron superiores a 80%. Por tanto el modelo de regresión explica bien el proceso.

El modelo matemático de la actividad de agua se establece en la (Ec. 13).

$$Y_2 = -0.143 + 0.042 X_3 - 0,0066X_4 - 0.0041 X_3^2 + 0.000006 X_4^2 + 0.00003 X_3 * X_4 \quad \text{Ec. 13}$$

En el análisis de varianza (Tabla 8), mostró que los términos lineales, cuadráticos y la interacción del tiempo de secado y la temperatura de secado fueron no significativos ($P \geq 0.05$) para la actividad de agua. Además la regresión del modelo de superficie de respuesta de segundo orden no es apto para explicar los datos experimentales de la actividad de agua ya que los resultados fueron no significativos. (Tabla 9)

La Figura 12 muestra el efecto de tiempo y la temperatura de secado convectivo sobre la actividad de agua de los carambolos osmodeshidratados a 100 min. La a_w disminuye al aumentar el tiempo de secado a temperaturas bajas (55°C) y a altas (65°C). En la gráfica de contorno se puede observar también, a 120 min de proceso y temperaturas entre 55°C o 65°C se obtiene un valor de $a_w \geq 0,6$. Para obtener valores de $a_w \leq 0,5$ se debe utilizar tiempo de secado largos a temperaturas de secado mayores a 60°C . Este comportamiento puede ser explicado por la impregnación superficial de la sacarosa durante el proceso de la deshidratación osmótica, donde se favorece la cristalización de la sacarosa en la parte externa del tejido durante el secado. Los carambolos con valores de $a_w \leq 0,6$ permiten mantener el alimento en buenas condiciones microbiológicas, debido a la inhibición de bacterias y moho ya que no tienen agua disponible para su crecimiento. De acuerdo con Frazier (1993) una a_w inadecuada ejerce un retraso de la iniciación del crecimiento o de la germinación de las esporas. La reducción

de la velocidad de crecimiento del microorganismo influye, consecuentemente, en la conservación del alimento.

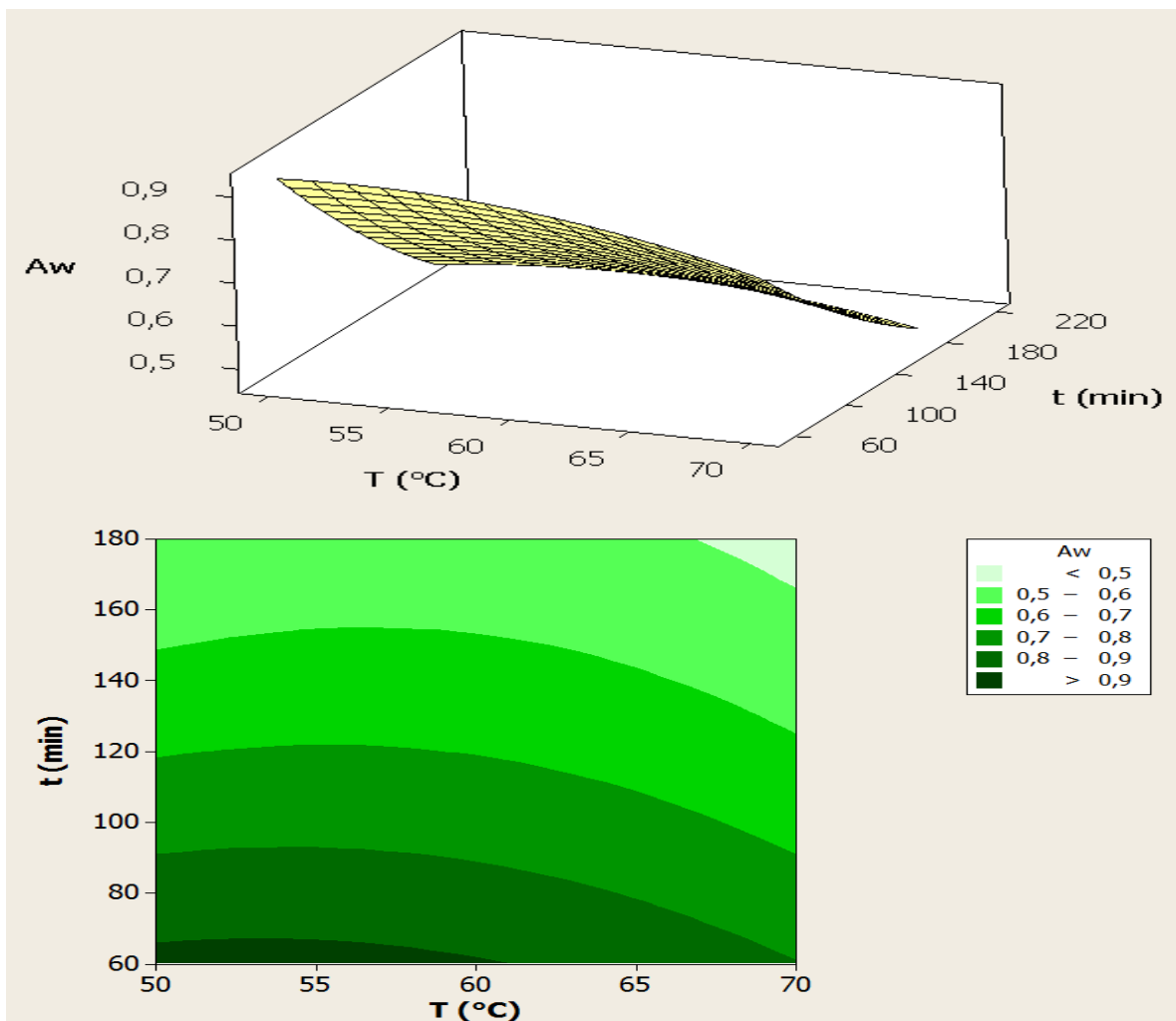


Figura 12: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto de la temperatura de secado y el tiempo de secado sobre la a_w de carambolos sometidos a 100 min de deshidratación osmótica.

El producto final sometido a un tratamiento de 100min de deshidratación osmótica, 60 $^{\circ}\text{C}$ de temperatura de secado y un tiempo de secado de 120 min, está expuesto a ser alterado fácilmente por microorganismos, al tener valores $a_w \geq 0,7$. Este factor aumenta la posibilidad de deterioro del carambolo en almacenamiento, debido al alto riesgo de contaminación a través de microorganismos (bacterias-hongos) por aumento del a_w . De acuerdo con Frazier

(1993) la humedad relativa de la atmósfera que rodea el alimento es mayor a la a_w del alimento, ésta tenderá a aumentar en la superficie del alimento, permitiendo la proliferación de microorganismos. Se requiere tener tiempos de secado largos y temperatura de secado altas para disminuir la actividad de agua.

7.3.1.5. DENSIDAD APARENTE (ρ_a)

El análisis de ANOVA determinó que existen diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en el modelo aplicado. Por tanto este resulta apropiado para explicar la relación funcional entre la densidad aparente (g/cm^3) de los carambolos que es deshidratado a 100 min y las variables de proceso, temperatura de secado (X_3), y tiempo de secado (X_4) y tal como se indica en la tabla 9. El coeficiente de determinación R^2 94,25 % fue adecuado por presentar un valor superior a 80%. Por lo tanto el modelo de regresión es apto para explicar el proceso. El modelo de superficie de respuesta de segundo orden puede ser usado para explicar los datos experimentales de la densidad aparente (Ec. 14).

$$Y_3 = -1,565 + 0.076 X_3 + 0.001 X_4 - 0.0005 X_3^2 - 0.00000 X_4^2 - 0.00003 X_3 * X_4 \quad (\text{Ec. 14})$$

En el análisis de varianza Tabla 9, evidenció que los términos lineales, cuadráticos del tiempo de secado no fueron significativos ($P \geq 0.05$) para la densidad aparente. Los términos lineales, cuadráticos de la temperatura de secado fueron significativos ($P \leq 0.05$), de igual forma que la interacción entre tiempo de secado y temperatura. Por tanto la densidad aparente de la fruta después de los tratamientos depende de la temperatura de secado.

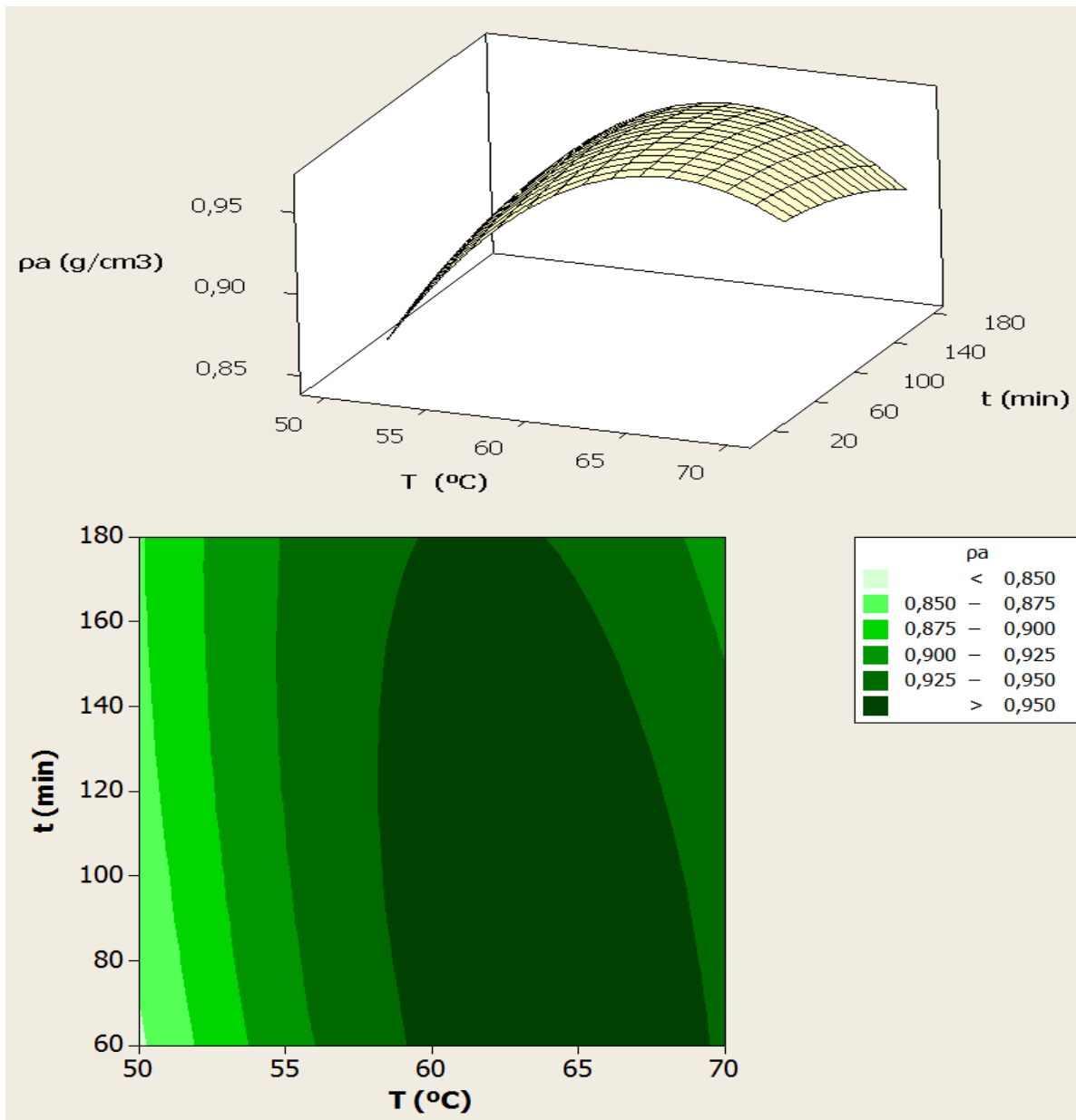


Figura 13: Figura 132: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto de la temperatura de secado y el tiempo de secado sobre la ρ_a de carambolos sometidos a 100 min de deshidratación osmótica.

En la Figura 13 muestra la interacción de los efectos de la temperatura del tiempo de secado sobre la densidad aparente de carambolos sometidos a 100 min de DO y el secado convectivo. Al aumentar la temperatura se observó, un aumento en la densidad aparente de los carambolos. El tiempo de secado no está afectando la ρ_a .

En la gráfica de contorno se evidenció el efecto de la temperatura sobre la densidad aparente en temperaturas entre 60 – 65 °C, presentándose un aumento en la densidad aparente a valores $\geq 0,95 \text{ g/cm}^3$.

Los cambios de la densidad aparente se relacionan con la pérdida de humedad del carambolo después del secado. Se observa una pérdida de humedad $\geq 0,9 \text{ kg agua/kg bs}$, y una densidad aparente $\geq 0,950 \text{ g/cm}^3$ a temperaturas $\geq 60^\circ\text{C}$ y tiempos de secado entre 60 - 180 min; con lo cual se puede afirmar que los carambolos secos presenta un aumento de la densidad aparente a mayor pérdida de humedad. Resultados similares se encontraron en el secado de membrillos previamente deshidratados osmóticamente (Koc et al., 2008).

7.3.1.6. POROSIDAD (ϵ)

El análisis ANOVA se determinó que existen diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en el modelo aplicado (Tabla 8). Por tanto este resulta apropiado para explicar la relación funcional entre la porosidad (ϵ) de la fruta y la temperatura de secado (X_3), y tiempo de secado (X_4) (Tabla 9). El coeficiente de determinación R^2 fue adecuado con 94,96 %. El modelo de superficie de respuesta de segundo orden puede ser usado para explicar los datos experimentales de la porosidad (Ec. 15).

$$Y_4 = -117.56 + 4.182X_3 + 0.000X_4 - 0.032X_3^2 - 0.000X_4^2 - 0.0003X_3 * X_4 \quad \text{Ec. 15}$$

En el análisis de varianza (Tabla 9), se evidenció que los términos lineales, cuadráticos del tiempo de secado no fueron significativos ($P \geq 0.05$) para la porosidad. De igual forma que la interacción entre tiempo y temperatura de secado. Los términos lineales, cuadráticos de la temperatura de secado fueron significativos ($P \leq 0.05$), Por lo tanto la porosidad de los cilindros después de los tratamientos depende de la temperatura de secado.

En la Figura 14 muestra la interacción de los efectos de la temperatura y el tiempo de secado sobre la porosidad de carambolos osmo-deshidratados

osmoticamente. Se observó un aumento en la porosidad con un aumento de la temperatura y del tiempo de secado. La gráfica de contorno muestra estos efectos, un aumento de la temperatura de secado de 60 – 65°C, y a 140 min de secado aumenta la porosidad a valores $\geq 25\%$. A 70°C y 180 min se observa una porosidad del 40%.

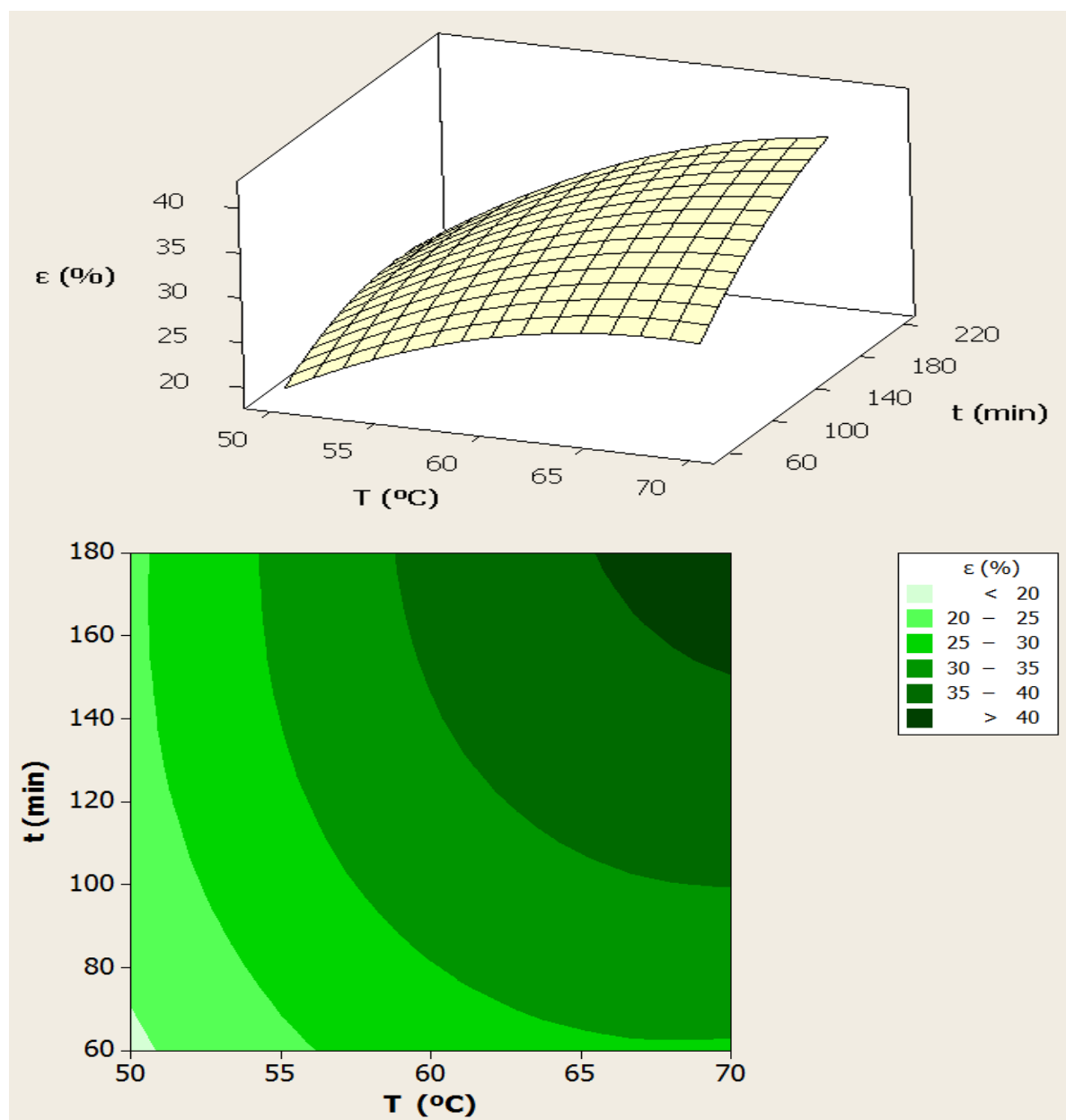


Figura 14: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto de la temperatura de secado y el tiempo de secado, sobre la ϵ de los carambolos sometidos a 100 min de deshidratación osmótica.

Los cambios de la porosidad se relacionan con la pérdida de humedad del carambolo después del secado. Las muestras con un pre-tratamiento osmótico sometidas al secado convectivo, se observa una pérdida de humedad $\geq 0,9$ kg agua/kg bs, y una porosidad con valores $\geq 35\%$ a temperaturas $\geq 60^{\circ}\text{C}$ y tiempos de secado de 140 min; con lo cual se puede afirmar que el carambolo al perder humedad se aumenta la porosidad (Anexo D). Resultados similares se encontraron en el secado de quince (Koc B et al., 2008). El aumento de la porosidad con la pérdida de humedad indica la contracción de material debido a la eliminación del agua. Comportamiento similar se encontraron en bamboo (Mandamba P, 2003).

7.3.1.7. VOLUMEN (V)

Por medio del análisis de varianza (ANOVA), se determinó que existen diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en el modelo aplicado (Tabla 8). El coeficiente de determinación de modelo fue R^2 84,04 %, Por tanto este modelo es apropiado para explicar la relación del cambio de volumen y las variables de proceso temperatura y tiempo de secado (Tabla 9). El modelo de superficie de respuesta de segundo orden no puede ser usado para explicar los datos experimentales del cambio de volumen. (Ec. 16).

$$Y_5 = -53,30 - 1,111 X_3 - 11,205 X_4 + 3,006 X_3^2 + 4,421 X_4^2 - 0,545 X_3 * X_4 \quad \text{Ec. 16}$$

En el análisis de varianza tabla 9, se evidenció que los términos lineales, cuadráticos existen diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre la temperatura y el tiempo de secado. La interacción de la temperatura de secado y el tiempo de secado no fueron significativos ($P \geq 0,05$) para el cambio de volumen. Por tanto el cambio de volumen de los cilindros después de los tratamientos depende de la temperatura de secado y del tiempo de secado.

La figura 15 se muestra la interacción de los efectos de la temperatura y el tiempo de secado sobre el cambio de volumen de carambolos sometidos a deshidratación osmótica. A cualquier temperatura de secado se presentó un aumento en el cambio de volumen cuando se aumenta el tiempo de secado.

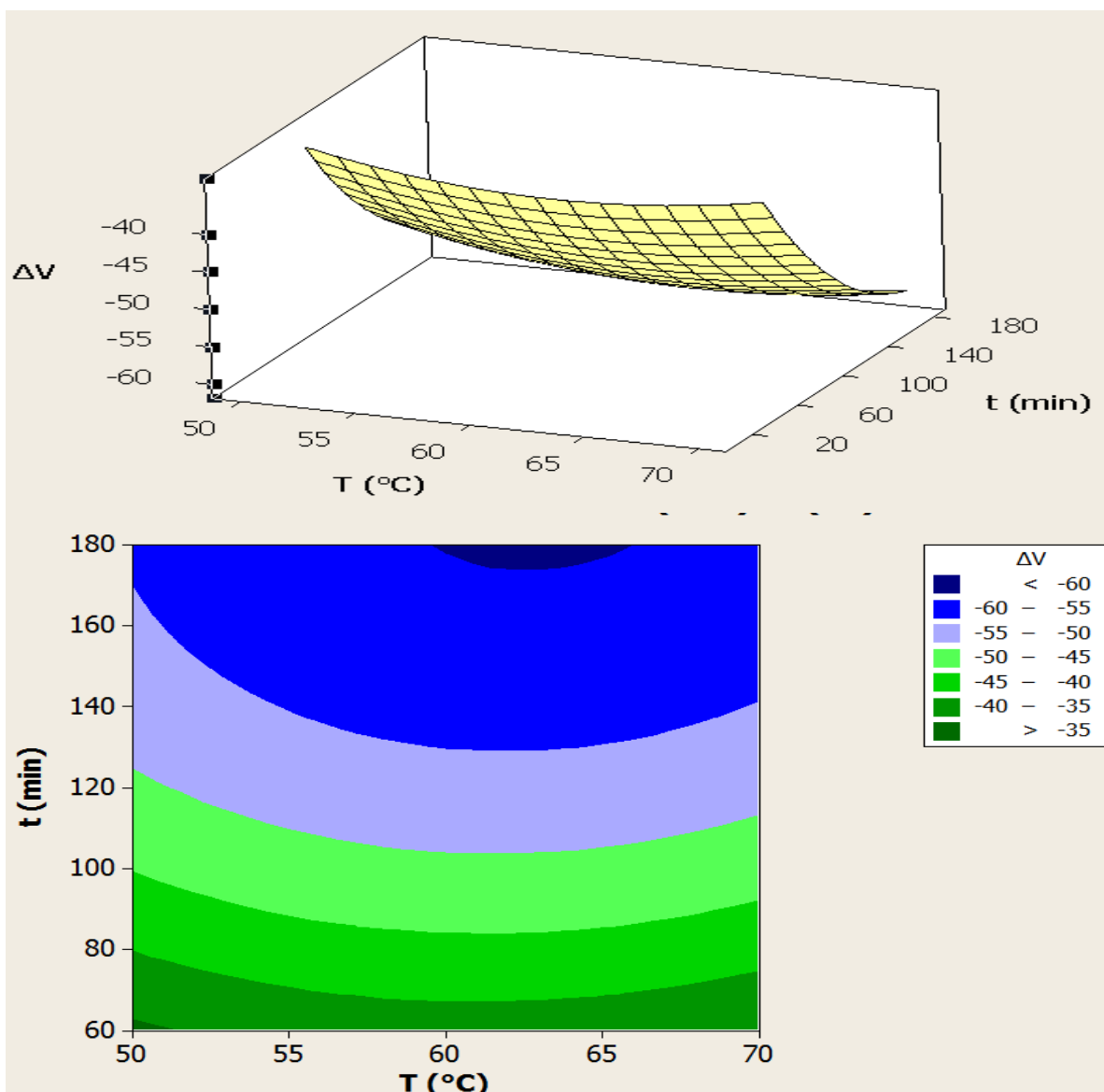


Figura 15: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto de la temperatura de secado y el tiempo de secado sobre el cambio de volumen de carambolos sometidos a 100 min de deshidratación osmótica.

En la gráfica de contorno se puede observar este comportamiento, al aumentar la temperatura de secado de 60 a 65 $^{\circ}\text{C}$ para 120 min de secado se evidenció un aumento del cambio de volumen con valores $\geq -50\%$. La mayor variación del

volumen (-60 %) se evidenció a partir de 180 min de secado entre 60 -65 °C. Los menores cambios del carambolo se presentaron entre 60 – 80 min de secado (valores <-35 %), entre 50 – 70°C.

Los cambios del volumen se relacionan con la pérdida de humedad del carambolo después del secado. Las muestras de carambolo entre 60 y 65 °C alcanzaron valores de pérdida de humedad $\geq 0,9$ kg agua/bs y una variación del volumen ≥ -55 %. Se evidenció una alta pérdida de humedad del carambolo después de los tratamientos y un aumento del cambio de volumen. Los mayores cambios tienen lugar en las últimas etapas del secado.

Se nota además, a temperaturas de secado entre 60-65 °C y un tiempo de secado entre 180 min, se observó un aumento en el cambio de volumen valores ≤ -60 %.

7.3.1.8. COLOR (ΔE^*)

El proceso de secado de cilindros de carambolo previamente sometidos a deshidratación osmótica presenta variación del color de los carambolos. A través del análisis de varianza (ANOVA), se determinó que existen diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en el modelo aplicado (Tabla 8). Por tanto este resulta apropiado para explicar la relación funcional entre la variación del color (ΔE) de los carambolos que es deshidratado a 100 min y las variables proceso, temperatura de secado (X_3), y tiempo de secado (X_4) y tal como se indica en la Tabla 9. El coeficiente de determinación R^2 84,66%,

El modelo de superficie de respuesta de segundo orden puede ser usado para explicar los datos experimentales de la variación del color. El modelo matemático se establece en la (Ec. 17).

$$Y_6 = 14,69 - 0,488 X_3 + 0,012 X_4 + 0,004 X_3^2 - 0,000 X_4^2 + 0,000 X_3 * X_4 \quad \text{EC. 17}$$

En el análisis de varianza Tabla 9 mostró que los términos lineales, cuadráticos y la interacción del tiempo de secado no fueron significativos ($P \geq 0.05$) para la variación del color. Los términos lineales, cuadráticos de la temperatura de secado fueron significativos significativas ($p \leq 0,05$) Por tanto la variación del color de la fruta depende de la temperatura de secado, pero no del tiempo de secado.

En la figura 16 se muestra la interacción de los efectos de la temperatura de secado y el tiempo de secado sobre el color de carambolos sometidos a 100 min de deshidratación osmótica. Al aumentar la temperatura de secado y aumentar el tiempo de secado se evidenció aumento en la ΔE .

La gráfica de contorno muestra el efecto del color en las variables de tiempo y temperatura de secado. Se evidenció el efecto significativo de la temperatura de secado; al aumentar la temperatura de 60 a 65 °C a 120 min de secado se evidenció un aumento en el cambio de color con valores ≥ 2 . A temperaturas $\geq 65^\circ\text{C}$ y tiempos de secado ≥ 120 min se presentaron cambios de color con valores $\geq 2,25$. Se observó que 70 °C y tiempos de secados ≥ 140 min los cambios de color fueron $\geq 2,75$. El menor efecto de la variación del color en los carambolos con tratamientos se aprecia a 60 °C y un tiempo de secado ≥ 60 min donde se evidenció una variación del color con valores $\leq 1,75$. La variación del color se debe a la cristalización de la sacarosa en la superficie del carambolo. Resultados similares se encontraron en el secado de piña y papa (Tan M et al., 2001).

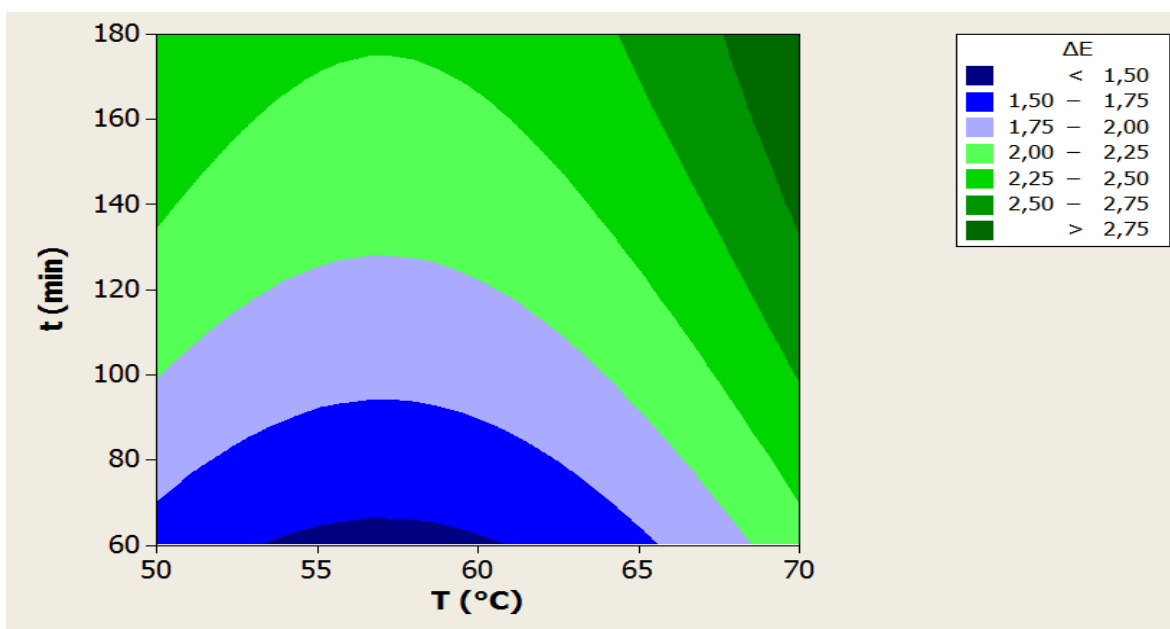
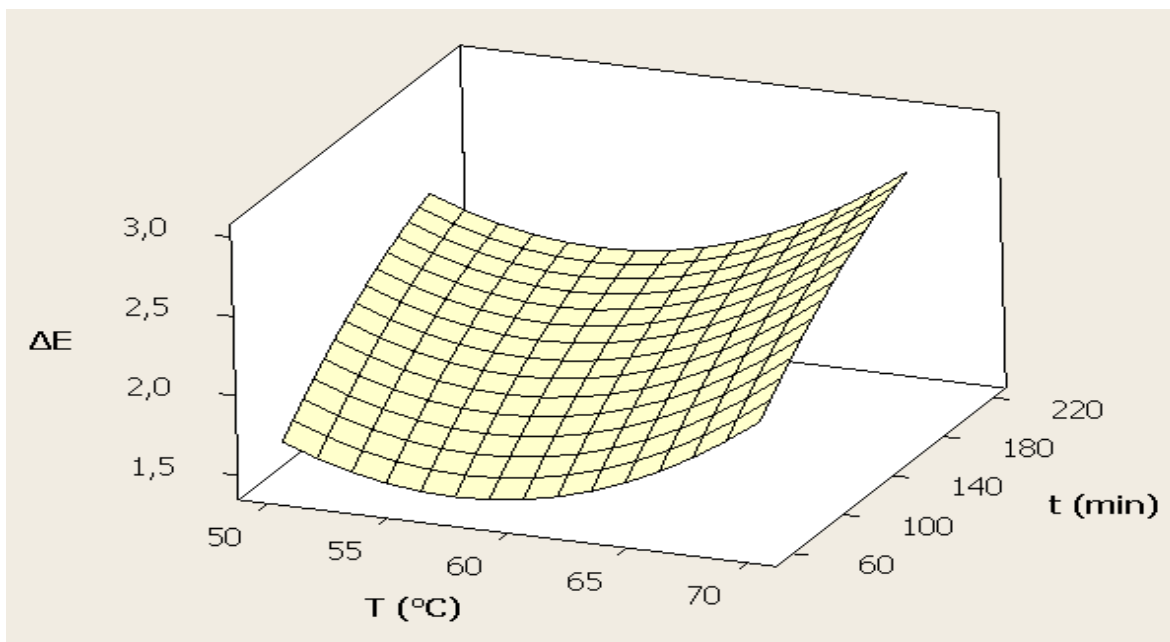


Figura 16: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto de la temperatura de secado y el tiempo de secado sobre la variación del color en carambolos sometidos a 100 min de deshidratación osmótica.

7.3.2. INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA ÓPTIMA DE SECADO DE 60-65°C , TIEMPO DE DO Y EL TIEMPO DE SECADO SOBRE LA PÉRDIDA DE HUMEDAD Y PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

De acuerdo al diseño de experimentos, se analizaron las pérdidas de humedad y propiedades fisicoquímicas (Actividad de agua, densidad aparente, porosidad, cambio de volumen y color (ΔE)) de muestras de carambolo osmosecadas. El parámetro fue la temperatura de secado entre 60-65°C y las variables de proceso fueron TDO de 100 min (55 °Brix) y tiempo de secado (min).

Se obtuvo una matriz de respuesta a la influencia de la temperatura (60-65°C), tDO y el tiempo de secado sobre la pérdida de humedad y propiedades fisicoquímicas. (Tabla 10)

Tabla 10: Matriz de respuesta según diseño de tratamientos DCCR.

Tratamiento	Repet	t DO (min)	t (min)	t DO (min)	t (min)	ΔX	Aw	Pa (g/cm ³)	ϵ (%)	ΔV (%)	ΔE
1	1	-1	-1	60	60	0,5903	0,9408	0,9074	25,64	-29,91	2,22
2	1	1	-1	60	180	0,9734	0,6054	0,8813	42,48	-65,91	2,96
3	1	-1	1	140	60	0,6719	0,9069	0,9403	27,22	-36,98	1,08
4	1	1	1	140	180	0,9654	0,5807	0,9381	38,79	-61,33	1,45
5	1	-1	0	100	60	0,6339	0,9131	0,9614	24,22	-38,03	1,62
6	1	1	0	100	180	0,9546	0,5225	0,9432	37,76	-60,68	2,19
7	1	0	-1	60	120	0,9064	0,6986	0,8709	38,96	-57,28	2,60
8	1	0	1	140	120	0,9240	0,6780	0,9362	36,63	-54,79	1,40
9	1	0	0	100	120	0,9082	0,6647	0,9367	35,29	-58,75	2,03
10	1	0	0	100	120	0,9137	0,6853	0,9672	33,25	-61,59	1,98
11	1	0	0	100	120	0,9016	0,7125	0,9749	32,80	-52,18	1,54
12	1	0	0	100	120	0,8939	0,5852	0,9590	33,98	-44,53	2,29
13	1	0	0	100	120	0,8929	0,8404	0,9561	33,39	-48,53	2,09

tDO: tiempo de deshidratación osmótica; t: tiempo de secado

Se determinó el análisis de varianza (ANOVA) para la pérdida de humedad y las propiedades físico-químicas. Para el análisis de superficie de respuesta con una temperatura óptima (60 -65 °C). (Tabla 11)

Tabla 11: Análisis de varianza (ANOVA) de los parámetros de regresión para el modelo de superficie de respuesta, para el secado de carambolo previamente sometidos a deshidratación osmótica. A una temperatura óptima de secado (60-65°C)

	gl	ΔX	a_w	$\rho a(g/cm^3)$	ε (%)	ΔV (%)	ΔE
Regresión	5	0,2068**	0,1942**	0,0109*	349,79**	1270,98**	2,99 *
Lineal	2	0,1671**	0,185 ns	0,0043*	296,55**	1148,17**	2,94**
Cuadrático	2	0,0376**	0,0086 ns	0,0064*	46,28**	88,89 ns	0,016 ns
Interacción	1	0,0020*	0,00002ns	0,0001*	6,95*	33,93 ns	0,03 ns
Error		0,00032	0,0344	0,0008	0,009	0,0019	0,005
R^2 (%)		99,72	83,85	89,85	98,32	84,54	90,63

*Significativo al nivel de ≤ 0.05 ; **Altamente significativo al nivel de ≤ 0.01 ; ns No significativo

Según el modelo matemático de superficie de respuesta de segundo orden se realizó la regresión de los parámetros para la pérdida de humedad y las propiedades físico-químicas. Para el análisis de superficie de respuesta con una temperatura óptima (60 -65 °C). (Tabla 12)

Tabla 12: Regresión modelo matemático de superficie de respuesta de segundo orden, según diseño de tratamientos, para el secado de carambolos previamente sometidos a deshidratación osmótica. A una temperatura óptima de secado (60-65°C)

FUENTE DE VARIACIÓN	ΔX	a_w	$\rho a(g/cm^3)$	ε (%)	ΔV (%)	ΔE
β_0	-0,3116**	1,5029*	0,7899**	2,8973 ns	-53,63**	1,984 **
$\beta_6 X_5$	0,0191**	-0,0100 ns	-0,0008 ns	0,6750 **	0,000 ns	0,280 **
$\beta_7 X_6$	0,0005ns	-0,0013 ns	0,0032**	-0,1787*	-13,83 **	-0,641**
$\beta_8 X_5^2$	-0,00007**	0,00003 ns	0,0000002ns	-0,0021**	-1,112 ns	-0,076 ns
$\beta_9 X_6^2$	0,000003ns	0,0000 ns	-0,000013**	0,00092**	5,567 ns	0,018 ns
$\beta_{10} X_5 * X_6$	-0,0000009*	0,0000 ns	0,000002ns	-0,0005*	2,912 ns	-0,092 ns

*Significativo al nivel de ≤ 0.05 ; **Altamente significativo al nivel de ≤ 0.01 ; ns No significativa

7.3.2.1. PÉRDIDA DE HUMEDAD

Para la temperatura de secado de 60 – 65 °C, se determinó la pérdida de humedad de los carambolos secos. Se aplicó un modelo matemático de superficie de respuesta como se observa en la matriz de respuesta (Tabla 4). Para determinar si las variables de proceso X_5 tiempo de deshidratación osmótica (min) y X_6 tiempo de secado (min) permite obtener los mejores resultados

Se aplicó un modelo de superficie de respuesta de segundo orden (Ec. 18) de la forma:

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 X_5 + \beta_2 X_6 + \beta_3 X_5^2 + \beta_4 X_6^2 + \beta_5 X_5 * X_6 \quad \text{Ec.18}$$

Por medio del análisis de varianza (ANOVA), se determinó que existen diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en el modelo aplicado (Tabla 11). Por tanto resulta apropiado para explicar la relación funcional entre la pérdida de humedad y las variables proceso, tiempo de deshidratación osmótica (X_5), y tiempo de secado (X_6) para los carambolos secados a entre 60 y 65 °C (Tabla 12). El coeficiente de determinación R^2 99,72%, fue adecuado porque los valores de R^2 fueron superiores a 80%. El modelo de regresión explica bien el proceso. De acuerdo a lo reportado en deshidratación de ciruela. Koocheki y Azarpazhooh, (2010).

El modelo de superficie de respuesta de segundo orden puede ser usado para explicar los datos experimentales de la pérdida de humedad. El modelo matemático de la pérdida de humedad se establece en la (Ec. 19).

$$Y_1 = -0.3116 + 0.0191X_5 + 0.0005X_6 - 0.00007 X_5^2 + 0.000003X_6^2 - 0.0000009 X_5 * X_6 \quad \text{Ec. 19}$$

En el análisis de varianza Tabla 11, se evidenció que los términos lineales, cuadráticos del tiempo de deshidratación osmótica fueron significativos ($P \leq 0.05$)

para la pérdida de humedad, de igual forma que la interacción entre tiempo de deshidratación osmótica y el tiempo de secado. Los términos lineales, cuadráticos del tiempo de secado no fueron significativos ($P \geq 0.05$). Por lo tanto la pérdida de la humedad de los carambolos después de los tratamientos depende del tiempo de deshidratación osmótica.

En la Figura 17 muestra la interacción entre el tiempo de deshidratación osmótica y el tiempo de secado sobre la pérdida de humedad de carambolos sometidos entre 60 – 65°C. De acuerdo al modelo estimado se puede afirmar que la variable tiempo de deshidratación osmótica está interactuando en el proceso de secado del carambolo permitiendo la pérdida de humedad del producto.

Los resultados asociados a la pérdida de humedad se relacionan con el tiempo de deshidratación osmótica. A medida que aumenta el tiempo de deshidratación osmótica aumenta la pérdida de humedad. Se observa también en la gráfica de contorno donde el tiempo de deshidratación osmótica ≥ 100 min mayor es la pérdida de humedad con valores $\geq 0,9$. Esto debe porque la solución osmótica con sacarosa disminuye el contenido de humedad del carambolo, por lo tanto se reduce el tiempo de secado. Resultados similares se encontraron en arandano (Shi et al., 2008).

La pérdida de humedad de los carambolos aumenta y se mantiene constante, para 100 min de deshidratación osmótica para tratamientos con temperaturas de secado entre 60 – 65 °C. Este comportamiento indica que los carambolos sometidos a un pre-tratamiento de 100 min de deshidratación osmótica presentan una pérdida de humedad. Al ser sometidos al secado convectivo se requiere menos temperatura y menos tiempo de secado para obtener muestras estables que permiten el almacenamiento.

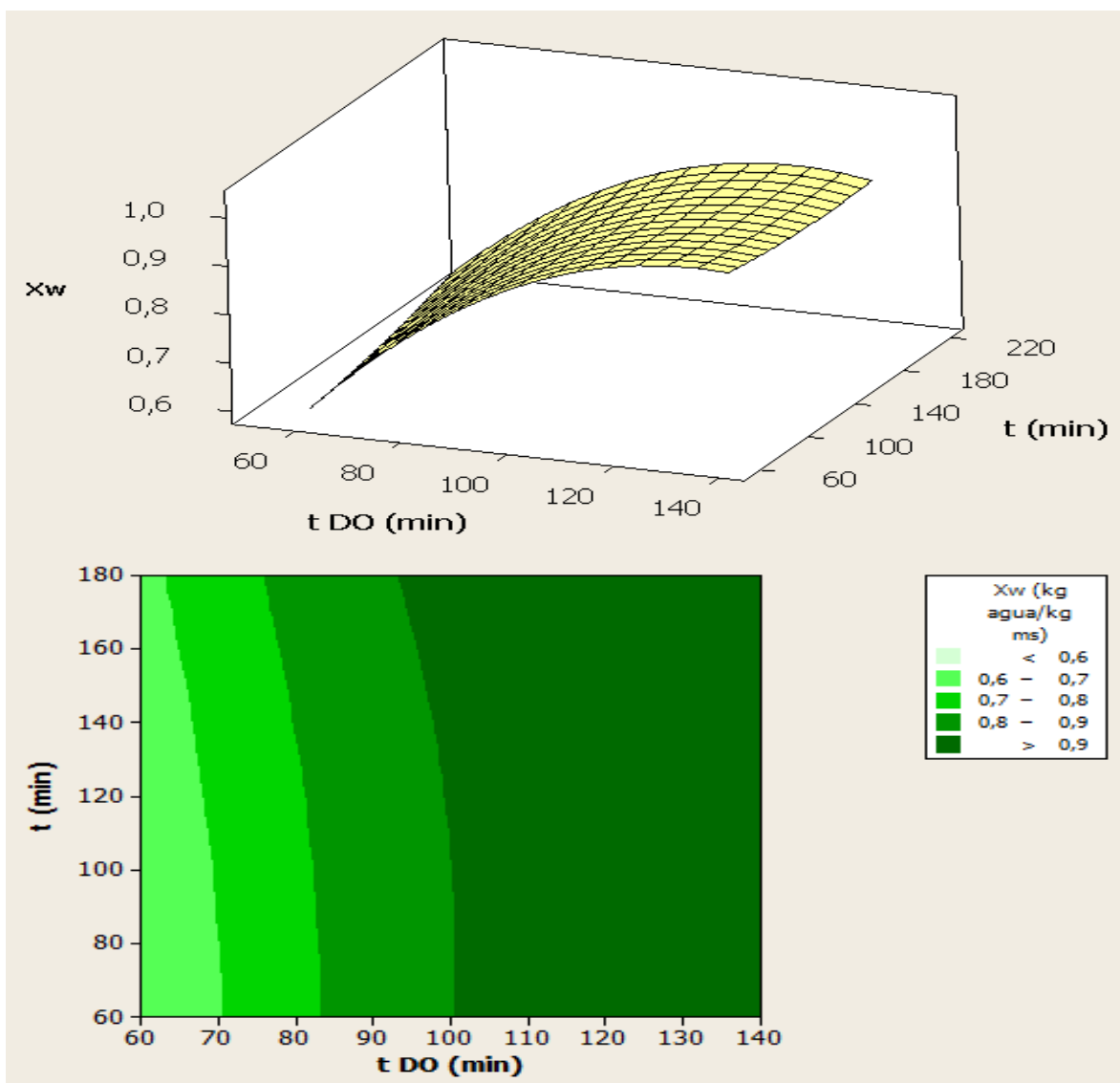


Figura 17: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto del tiempo de deshidratación osmótica y el tiempo de secado sobre la pérdida de humedad de carambolos sometidos a una temperatura de secado entre 60 - 65 °C.

7.3.2.2. ACTIVIDAD DE AGUA (a_w)

El análisis de varianza (ANDEVA) determinó que no existen diferencias significativas ($p \geq 0,05$) en el modelo aplicado (Tabla 11). Por tanto este no resulta apropiado para explicar la relación funcional entre la actividad de agua de los carambolos que son secados convectivamente entre 60 – 65 °C y las variables de proceso, tiempo de deshidratación osmótica (X_5), y tiempo de secado (X_6)

(Tabla 12). El coeficiente de determinación R^2 83,85%, fue adecuado porque los valores de R^2 fueron superiores a 80%. Por lo tanto el modelo de regresión es apto para explicar el proceso

El modelo de superficie de respuesta de segundo orden no puede ser usado para explicar los datos experimentales de la actividad de agua. Este modelo matemático de la a_w se establece en la (Ec. 20).

$$Y_2 = 1.5029 - 0.0100X_5 - 0.0013X_6 + 0.00003 X_5^2 + 0.0000X_6^2 + 0.0000 X_5 \cdot X_6 \text{ EC. 20}$$

En el análisis de varianza tabla 12, se evidenció que los términos lineales, cuadráticos y la interacción del tiempo de deshidratación osmótica y tiempo de secado no fueron significativos ($P \geq 0.05$), para la actividad de agua. Por tanto la actividad de agua de los carambolos después de los tratamientos no depende el tiempo de deshidratación osmótica, ni del tiempo de secado.

En la Figura 18 se muestra la interacción el tiempo de deshidratación osmótica y el tiempo de secado sobre la actividad de agua de carambolos sometidos a una temperatura de secado entre 60 – 65°C. Se evidenció que el tiempo de secado influyó en la actividad de agua del carambolo. Los menores efectos se presentaron en la variación del tiempo de deshidratación osmótica.

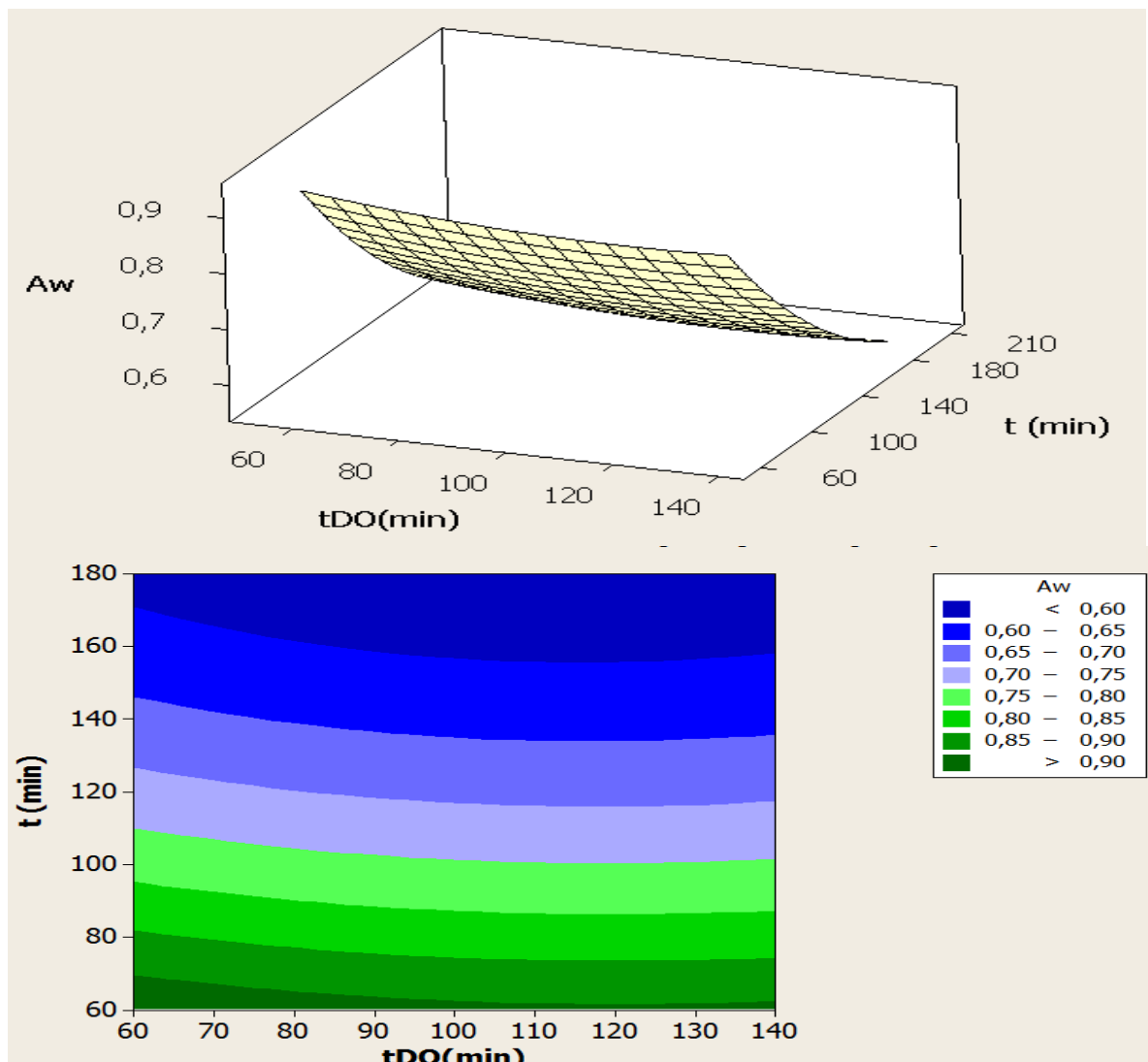


Figura 18: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto del tiempo de deshidratación osmótica y el tiempo de secado sobre la a_w de los carambolo sometidos a una temperatura de secado entre 60 - 65 °C.

Se observó que a largos tiempos de secados, la actividad de agua disminuye y el tiempo de deshidratación no afecta el proceso. Esto se corrobora en la gráfica de contorno donde a 140 min de tiempo de secado se presentó a_w con valores $\leq 0,65$. Los carambolos que fueron tratados con un tiempo de secado de 180 min y cualquier tiempo de deshidratación osmótica los valores de a_w fueron $\leq 0,6$. Los carambolos con $a_w \leq 0,6$ indica que se reduce el crecimiento microbiano y permite su conservación. De acuerdo con Frazier (1993) a a_w inferiores a 0,62 cesa toda posibilidad de crecimiento de moho.

La a_w se relaciona con la pérdida de humedad del carambolo durante el secado. A 100 min de deshidratación osmótica alcanzaron valores de pérdida de humedad $\geq 0,9$ kg agua/bs y una a_w de 0,6. Se evidenció una alta pérdida de humedad del carambolo y una disminución de la a_w . La explicación de este proceso es posible por la impregnación superficial de la sacarosa durante el proceso de la deshidratación osmótica, donde se favorece la cristalización de la sacarosa en la parte externa del tejido durante el secado (Mandala et al.,2004). Este hecho evita la difusión del agua, por tanto la disminución del contenido de humedad es más bajo en tiempo de secados cortos como lo indica Mandala et al., (2004).

7.3.2.3. DENSIDAD APARENTE (ρ_a)

El análisis de varianza (ANOVA), determinó que existen diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en el modelo aplicado (Tabla 11). Por tanto este resulta apropiado para explicar la relación funcional entre la densidad aparente (g/cm^3) de los carambolos que son secados a 60-65 °C y las variables proceso, tiempo de deshidratación osmótica (X_5), y tiempo de secado (X_6) y tal como se indica en la tabla 12. El coeficiente de determinación R^2 89.85 %, fue adecuado por presentar un valor superior al 80 %.

Por lo tanto el modelo de regresión es apto para explicar el proceso. El modelo de superficie de respuesta de segundo orden puede ser usado para explicar los datos experimentales de la densidad aparente. El modelo matemático de la densidad aparente se establece en la (Ec. 18).

$$Y_3 = 0.7899 - 0.0008X_5 + 0.0032X_6 + 0.0000002X_5^2 - 0.000013X_6^2 + 0.000005 X_5 * X_6 \quad \text{Ec. 21}$$

En el análisis de varianza (Tabla 13), se evidenció que los términos lineales, cuadráticos del tiempo de deshidratación osmótica fueron no significativos ($P \geq 0.05$) para la densidad aparente. De igual forma que la interacción entre tiempo de deshidratación osmótica y el tiempo de secado. Los términos lineales, cuadráticos del tiempo de secado fueron significativos ($P \leq 0.05$). Por tanto la

densidad aparente de los cilindros después de los tratamientos depende el tiempo de secado.

En la Figura 19 muestra la interacción de los efectos entre el tiempo de deshidratación osmótica y el tiempo de secado sobre la densidad aparente de carambolos sometidos a temperaturas de secado entre 60 – 65 °C. Al aumentar los tiempos de secado se evidenció un aumento en la densidad aparente. En la gráfica de contorno corroboró el efecto del tiempo de secado sobre la densidad aparente. A tiempos de secado de 120 min se observó una densidad aparente con valores $\geq 0,94 \text{ g/Cm}^3$.

Cabe anotar que los tratamientos sometidos a un tiempo de deshidratación osmótica entre 60 a 100 min y un tiempo de secado entre 100 a 160 min presentan una densidad aparente mayor al 0.96 g/cm^3 .

Los cambios de la densidad aparente se relacionan con la pérdida de humedad del carambolo después del secado. Las muestras secas a una temperatura de secado entre 60 y 65 °C. Para 100 min de deshidratación osmótica alcanzaron valores de pérdida de humedad $\geq 0,9 \text{ kg agua/bs}$ y una densidad aparente entre $0,94 \text{ g/cm}^3$. Se evidenció una alta pérdida de humedad del carambolo después de los tratamientos y un aumento en la densidad. Resultados similares se encontraron en el secado de membrillos previamente deshidratados osmóticamente (Koc B et al., 2008).

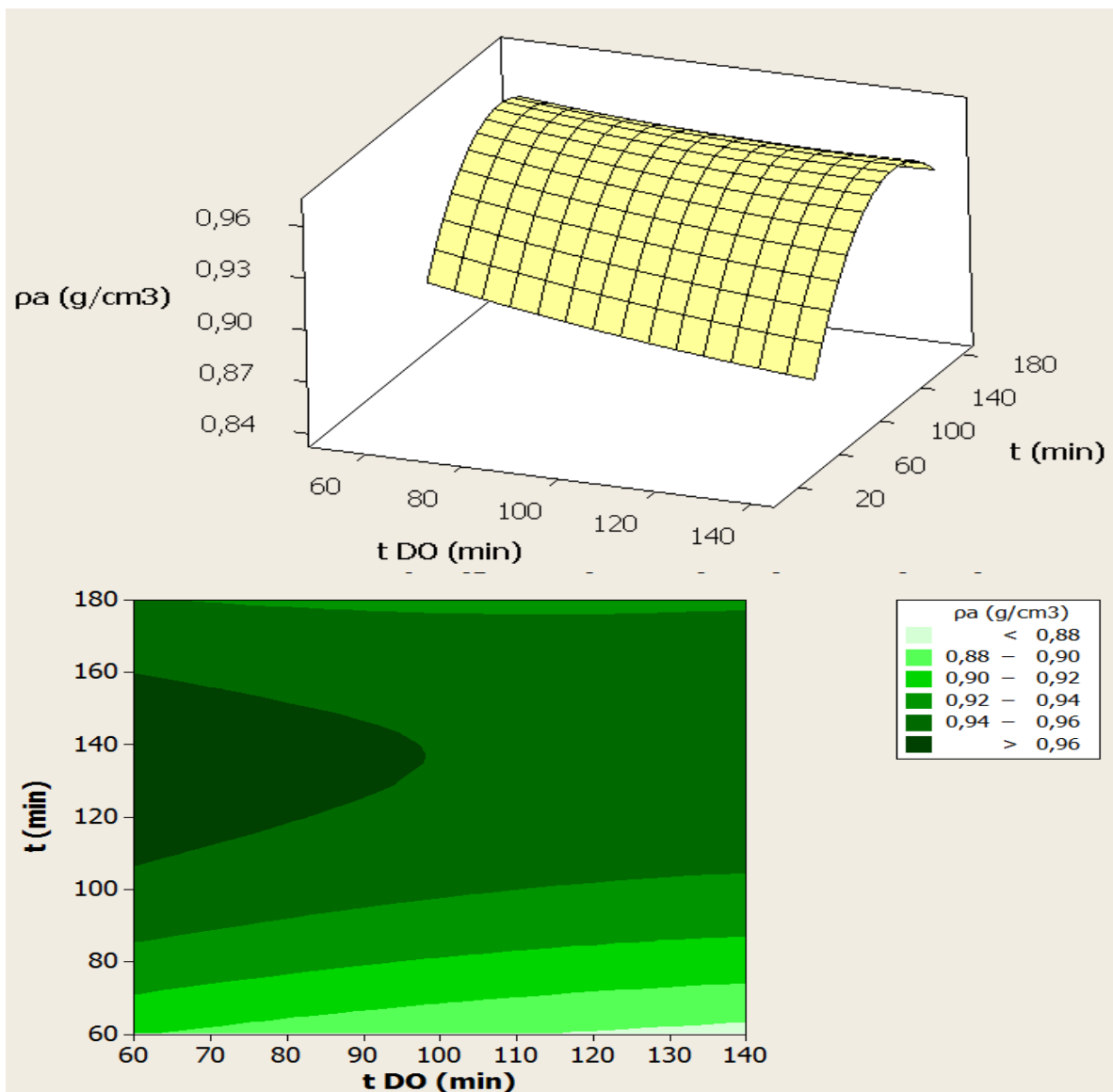


Figura 19: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto del tiempo de deshidratación osmótica y el tiempo de secado sobre la ρ_a de carambolos sometidos a una temperatura de secado entre 60 - 65 ° C.

7.3.2.4. POROSIDAD (ϵ)

El análisis de varianza (ANOVA), se determinó que existen diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en el modelo aplicado (Tabla 11). Por tanto resulta apropiado para explicar la relación funcional entre la porosidad (ϵ) de la fruta que es secada a 60-65°C y las variables de proceso, tiempo de deshidratación osmótica (X_5), y tiempo de secado (X_6) (Tabla 12). El coeficiente de determinación

R^2 fue adecuado con 98,32 %. El modelo de superficie de respuesta de segundo orden puede ser usado para explicar los datos experimentales de la porosidad (Ec. 22).

$$Y_4 = 2.8973 + 0.6750X_5 - 0.1787X_6 - 0.0021X_5^2 + 0.00092X_6^2 - 0.0005 X_5 * X_6 \text{ EC. 22}$$

En el análisis de varianza tabla 12, se evidenció que los términos lineales, cuadráticos y la interacción del tiempo de deshidratación osmótica y tiempo de secado son significativos ($P \leq 0.05$). Por tanto la porosidad de los carambolos después de los tratamientos depende del tiempo de deshidratación osmótica y el tiempo de secado.

En la Figura 20 se aprecia la interacción de los efectos entre el tiempo de deshidratación osmótica y el tiempo de secado sobre la porosidad de carambolos sometidos a temperaturas de secado entre 60 – 65 °C. Al aumentar el tiempo de deshidratación osmótica se observa que la porosidad aumenta. La gráfica de contorno presenta el efecto del tiempo de deshidratación osmótica sobre la porosidad. A valores ≥ 100 °C de temperatura de secado se evidenció que la porosidad tiene valores ≥ 35 %.

Cabe anotar que los tratamientos con valores \leq a 100 min de deshidratación osmótica también se observó aumento de la porosidad con valores ≥ 30 %. Se nota además, que a 60 min de deshidratación osmótica y un tiempo de secado ≥ 120 min, se observa un aumento de porosidad del 40 %.

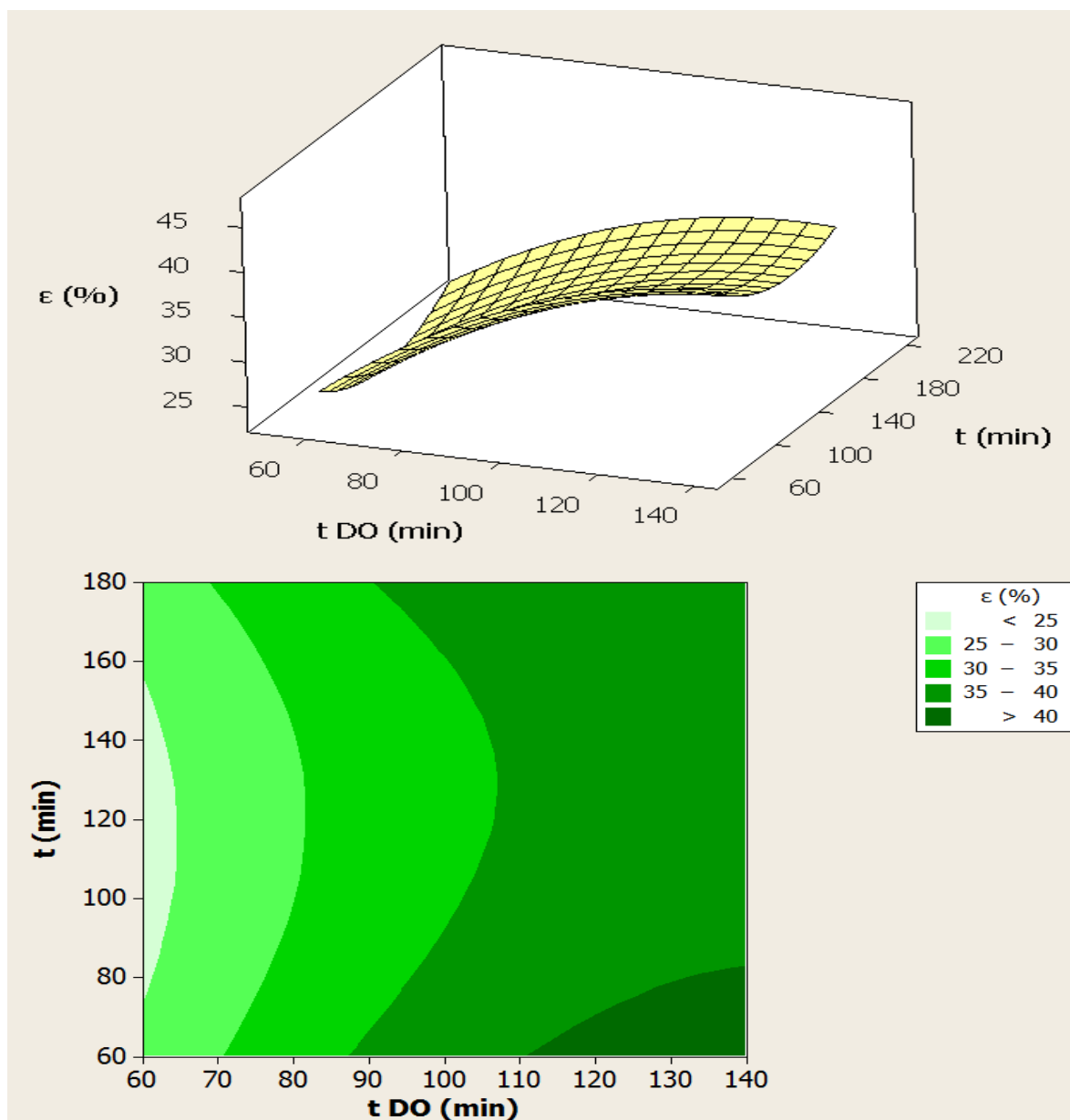


Figura 20: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto del tiempo de deshidratación osmótica y el tiempo de secado, sobre la ϵ de carambolos sometidos a una temperatura de secado entre 60 - 65 °C.

Los cambios de la porosidad se relacionan con la pérdida de humedad del carambolo después del secado. Las muestras secas a una temperatura de secado entre 60 y 65 °C. Para 100 min de deshidratación osmótica alcanzaron valores de pérdida de humedad $\geq 0,9$ kg agua/bs y una porosidad $\geq 35\%$. Se evidenció una alta pérdida de humedad del carambolo después de los tratamientos y un aumento en la porosidad. Resultados similares se encontraron en el secado de membrillo, ciruela, higos y fresa (Tsami E et al., 2000). Esto ocurrió porque a

mayor pérdida de humedad, las partículas se vuelven más deformes debido al encogimiento del carambolo. Resultados similares se encontraron en secado de papa, remolacha y zanahoria (Telis et al., 2003).

7.3.2.5. VOLUMEN (V)

Por medio del análisis de varianza (ANOVA), se determinó que existen diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en el modelo aplicado (Tabla 11).

El coeficiente de determinación de modelo fue R^2 84,54 %. Por tanto este modelo es apropiado para explicar la relación del cambio de volumen y las variables de proceso tiempo de deshidratación osmótica y tiempo de secado (Tabla 12). El modelo de superficie de respuesta de segundo orden no puede ser usado para explicar los datos experimentales del cambio de volumen. (Ec. 23).

$$Y_5 = -53,63 + 0,000X_5 - 13,833X_6 - 1,1128X_5^2 + 5,5667X_6^2 - 2,9125 X_5 * X_6 \text{ EC. 23}$$

En el análisis de varianza (Tabla 12), se evidenció que el término lineal del tiempo de deshidratación osmótica es significativa ($P \leq 0.05$). Los términos lineales del tiempo de secado, los cuadráticos y la interacción del tiempo de deshidratación osmótica y tiempo de secado son no significativos ($P \geq 0.05$) para el cambio de volumen. Por tanto el cambio de volumen de los cilindros después de los tratamientos no depende del tiempo de secado.

En la Figura 21 se aprecia la interacción de los efectos entre el tiempo de deshidratación osmótica y el tiempo de secado sobre el cambio de volumen de carambolos sometidos a temperaturas de secado entre 60 – 65 °C.

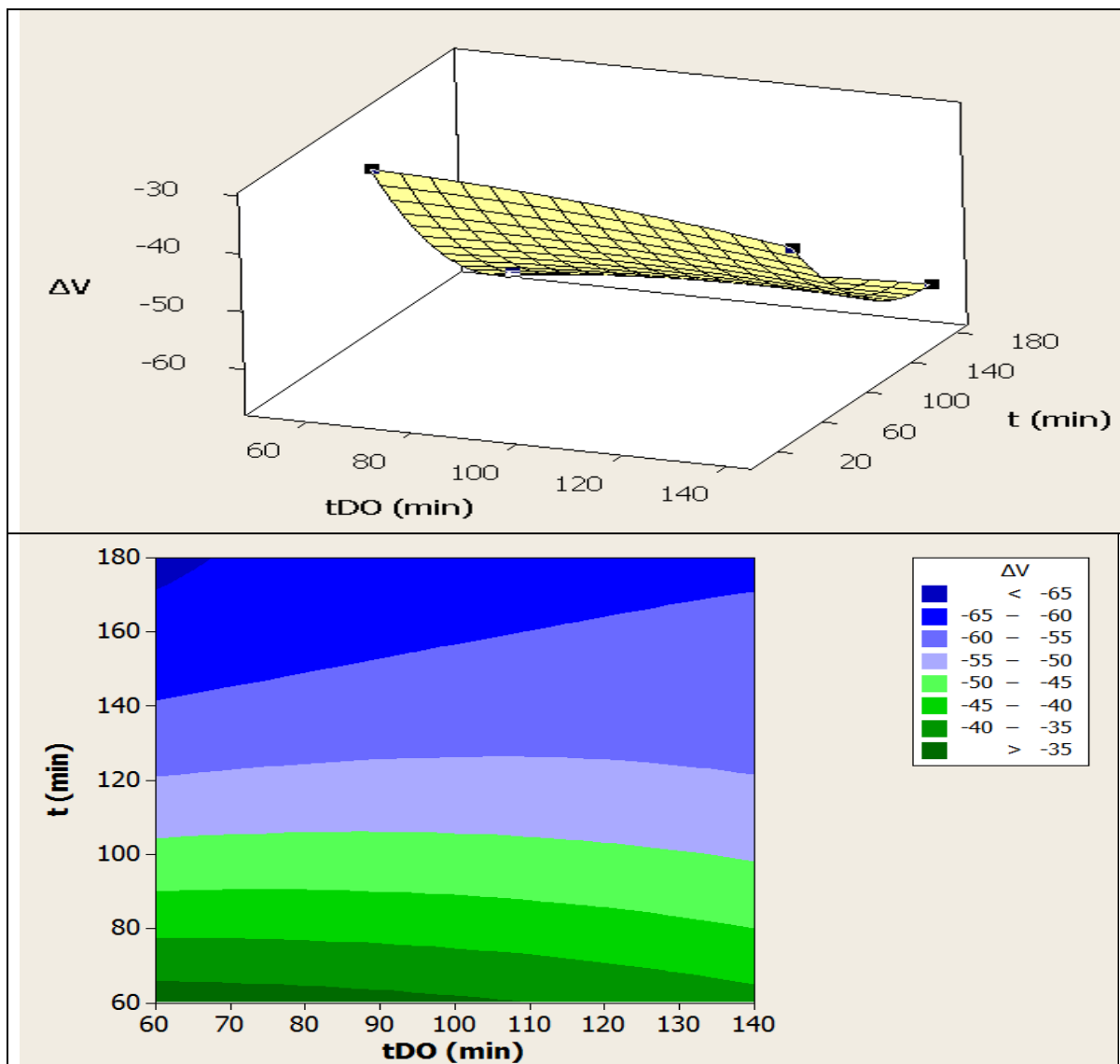


Figura 21: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto del tiempo de deshidratación osmótica y el tiempo de secado sobre el cambio de volumen de carambolos sometidos a una temperatura de secado entre 60 - 65 ° C.

Al aumentar el tiempo de deshidratación osmótica se observó un aumento en el cambio de volumen. Los menores cambios de volumen se observaron a tiempo cortos de deshidratación osmótica.

En la gráfica de contorno se presenta el efecto del cambio de volumen y las variables tiempo de deshidratación osmótica y tiempo de secado. A 140 min de secado, y tiempo de deshidratación osmótica ≥ 100 se evidenció un aumento en el

cambio de volumen con valores $\geq -55\%$. A tiempo de deshidratación osmótica \leq de 100 min se observó un aumento en el cambio de volumen con valores $\leq -40\%$.

7.3.2.6. COLOR (ΔE^*)

El proceso de secado de carambolo previamente sometidos a deshidratación osmótica presenta variación del color. A través del análisis de varianza (ANOVA), se determinó que existen diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en el modelo aplicado (Tabla 11). Por tanto este resulta apropiado para explicar la relación funcional entre la variación del color y las variables de proceso, tiempo de deshidratación osmótica (X_5), y tiempo de secado (X_6) para los carambolos que son secados a una temperatura entre 60 y 65 °C (tabla 12). El coeficiente de determinación R^2 90, 63% fue adecuado porque los valores de R^2 fue superior al 80%.

El modelo de superficie de respuesta de segundo orden puede ser usado para explicar los datos experimentales de la variación de color. El modelo matemático de la pérdida de humedad se establece en la (Ec. 24).

$$Y_6 = 1,98 + 0,280X_5 - 0,641X_6 - 0,076X_5^2 + 0,018X_6^2 - 0,092 X_5 \cdot X_6 \text{ EC. 24}$$

El significado de cada coeficiente y sus interacciones, se determinó mediante la prueba t (valor t). En el análisis de varianza tabla 13, se evidenció que los términos cuadráticos y la interacción del tiempo de deshidratación osmótica y el tiempo de secado no fueron significativos ($P \geq 0,05$) para la variación del color.

En la Figura 22 se aprecia la interacción de los efectos entre el tiempo de deshidratación osmótica y el tiempo de secado sobre la variación del color de carambolos sometidos a temperaturas de secado entre 60 – 65 °C. Al aumentar el

tiempo de deshidratación osmótica y aumentar el tiempo de secado se presenta la menor variación del color en los carambolos.).

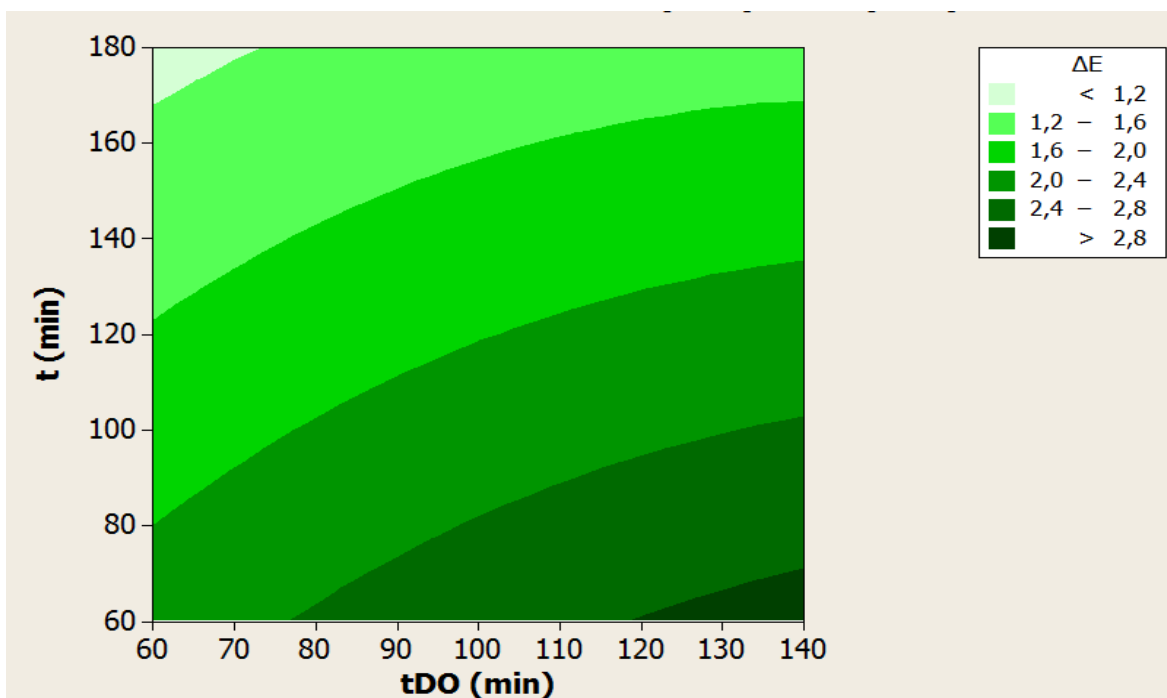
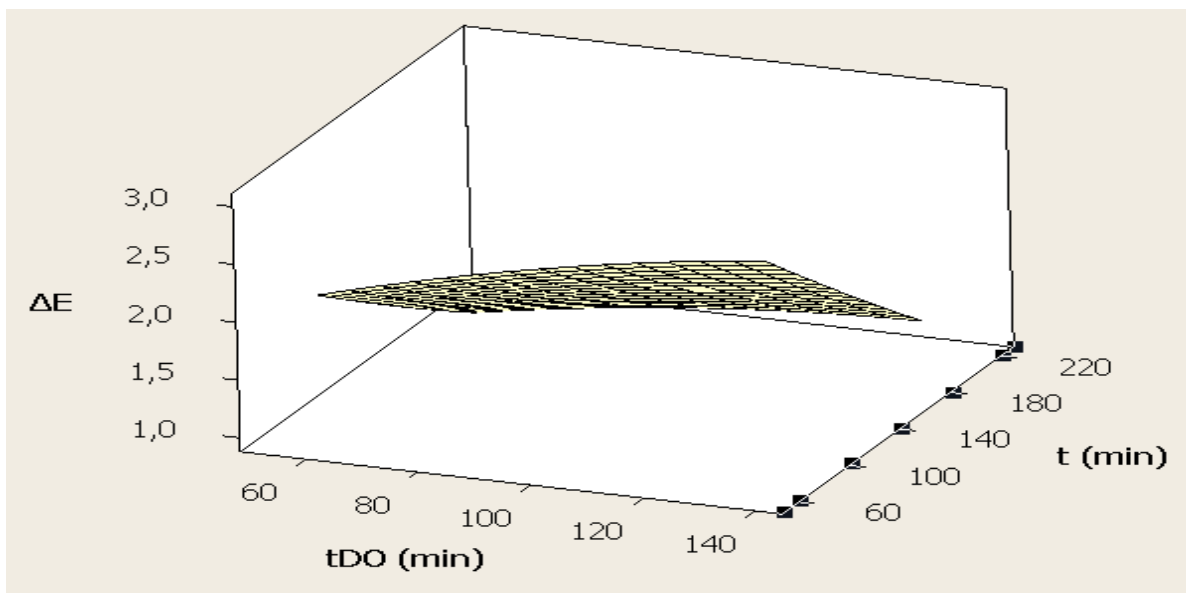


Figura 22: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto del tiempo de deshidratación osmótica y el tiempo de secado sobre la variación del color en carambolos sometidos a una temperatura de secado entre 60 - 65 ° C.

A menores tiempos de deshidratación osmótica y mayores tiempos de secado se presenta mayor valor de variación del color. La gráfica de contorno muestra la variación del color en las variables predictoras tiempo de deshidratación osmótica

y tiempo de secado. Se observó que a tiempos de deshidratación osmótica con valores ≤ 60 min y tiempos de secado ≥ 120 min se presenta la menor variación del color (valores $\leq 1,6$) de los carambolos después de realizar los tratamientos. La mayor variación del color (valores $\geq 2,8$) se presenta cuando se aumenta el tiempo de deshidratación osmótica (≥ 120 min) y un tiempo de secado de 60 min. A 100 min de deshidratación osmótica y un aumento del tiempo de secado (≥ 140 min) se evidenció una menor variación del color ($\leq 1,2$). Si se disminuye el tiempo de secado 60 min aumenta la variación del color (valores entre 2,4 -2,8

7. CONCLUSION

- De la optimización de las variables de proceso del secado osmo-convectivo con aire caliente de carambolo se observó que el mayor efecto en los tratamientos para establecer las mejores condiciones y maximizar las variables de respuesta se presentaron a 100 min de deshidratación osmótica, temperaturas de secado entre 60-65°C a tiempos de secado de 140 min.
- Los parámetros pérdida de humedad, a_w , densidad aparente, porosidad, volumen, color fueron influenciados positivamente mejorando la calidad del producto final, por la aplicación del pre-tratamiento osmótico (100 min) y la temperatura.
- Las mejores condiciones de secado con aire caliente previamente sometidas a deshidratación osmótica de placas infinitas de sección circular de carambolo fueron: Contenido de humedad de 0,9 kg H₂O/m.s, $a_w \leq 0.6$,

densidad aparente de $0,95 \text{ g/cm}^3$, porosidad de 35 %, Cambio de volumen 55 %, diferencia total de color 2,5.

- Los carambolos sometidos a estas condiciones presentan una influencia significativa ($P \leq 0.05$) en la pérdida de humedad, densidad aparente, porosidad, ΔV y ΔE . Se evidenció un aumento de la densidad aparente, disminución de la porosidad, aumento en el cambio de volumen con la disminución del contenido de humedad. Se observó que a estas condiciones a_w presenta valores entre 0,5-0,6. Garantizando la estabilidad microbiológica del carambolo al final del proceso.
- Se evidenció un $Deff$ satisfactorio para el secado osmo-convectivo de carambolo para las condiciones de 100 min de deshidratación osmótica, temperaturas de secado entre $60-65^\circ\text{C}$. Los resultados muestran la dependencia de la temperatura con el $Deff$, ya que se observó un aumento del $Deff$ a medida que aumenta la temperatura de secado. También se evidencio valores de $Deff$ más altos en muestras de carambolo frescos, que en las muestras con secado osmo-convectivo. Se puede afirmar que a estas condiciones se dio lugar a la reducción del contenido de humedad, difusividad y la energía de activación en el secado osmo-convectivo de carambolo.
- Los resultados muestran que el uso de 55 °brix y 100 min de deshidratación osmótica seguidos por el secado convectivo a temperaturas entre $60-65^\circ\text{C}$ con un tiempo de secado de 140 min, es una ventaja porque acelera el proceso de secado y reduce el tiempo de secado del carambolo.
- De acuerdo a estos resultados la técnica combinada de deshidratación osmótica y secado convectivo (osmosecado) es apropiada para disminuir las pérdidas de calidad de carambolo en el secado convectivo de aire caliente. Esta técnica puede ser aplicable para el secado de otras frutas.

8. BIBLIOGRAFÍA

Abbas A, Moreira P, Xidich FE (2002) Drying kinetics of fresh and osmotically pre-treated papaya (*Carica papaya* L). J. Food Eng. 59: 85-91.

Alyala AA, Serna-Cock y Giraldo CJ (2009) Efecto de la agitación sobre la deshidratación osmótica de pitaya amarilla (*Selenicereus megalanthus* s.) empleando soluciones de sacarosa. Interciencia 34: 492-496.

Ayala AA, Serna-Cock y Mosquera E (2010) Liofilización de Pitaya amarilla (*Selenicereus megalanthus* s.) Revista de la facultad de Química farmacéutica VITAE 17:121-127.

Alvarez CA, Aguerre R, Gomez R, Vidales S, Alzamora SM, Gerschenson LN (1995) Air dehydration of strawberries: effects of blanching and osmotic pre treatments on the kinetics of moisture transport. J. Food Eng. 25: 167–178.

Andrade MJ, Moreno C (2010) Influencia del tratamiento uv-c sobre carambola (*Averrhoa carambola* L.) mínimamente procesada. Enfoque, Revista Tecnológica. 1: 2-12.

Babalís SJ, Belessiotis VG (2004) Influence of the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. J. Food Eng. 65: 449–458.

Bahadur S, Gupta AK (2007) Mass transfer kinetics and determination of effective diffusivity during convective dehydration of pre-osmosed carrot cubes. J. food Engineering 79: 459–470.

Blach D, Donado J, Pinzón M (2007) Actividad de la peroxidasa y polifenoloxidasa en rodajas de carambola (*averrhoa carambola* l.) fresco cortado durante su almacenamiento en atmósfera modificada, Laboratorio de Investigaciones en Postcosecha, Universidad del Quindío.

Cantwell M (1992) Postharvest handling systems: Minimally processed fruits and vegetables. In: *Postharvest Technology of Horticultural Crops*. 2nd ed. Division of Agricultural and Natural Resources. AA Kader. (Ed.) University of California Publication 3311: 277-281

Castelló ML, Fito PJ, Chiralt A (2010) Changes in respiration rate and physical properties of strawberries due to osmotic dehydration and storage. J. Food Eng. 97: 64–71.

Castilho C, Aparecida MM, Kimura M (2007) Kinetics of osmotic dehydration and air-drying of pumpkins (*Cucurbita moschata*). J. Food Eng. 82: 284–291.

Castro M, Tylewicz U, Fito P, Dalla R (2011) Analysis of chemical and structural changes in kiwifruit (*Actinidia deliciosa* cv *Hayward*) through the osmotic dehydration. J. Food Eng. 105: 599-608.

Chong CH, Law CL, Cloke M, Hii CL, Abdullah LC, Wan Daud WR (2008) Drying kinetics and product quality of dried Chempedak. J. of Food Engineering 88: 522–527.

Crank J (1975) The Mathematics of Diffusion, second ed. Clarendon Press, Oxford. El-Aouar, A.A., Azoubel, P.M., Murr, F.E.X., 2003. Drying Kinetics of Fresh and Osmotically Pré-Treated Papaya (*Carica papaya* L.). Journal of Food Engineering. 59 (1), 85–91

Dermesonlouoglou EK, Pourgouri S, Taoukis PS (2008) Kinetic study of the effect of the osmotic dehydration pre-treatment to the shelf life of frozen cucumber. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 9: 542-549

Doymaz I (2005) Drying characteristics and kinetics of okra. J. Food Eng. 69: 275-279.

Doymaz I (2006) Drying behaviour of green beans J. Food Eng. 69: 161–165.

Mosquera ES (2009) Cambios en la cinetica de secado, porosidad y esfuerzo de fractura en pitahaya amarilla (var. *selenicereus megalanthus*) liofilizada y osmoliofilizada" en: Colombia. VII congreso iberoamericano de ingeniería de alimentos, cibia VII, Bogota.

Frazier W (1993) Microbiología de alimento. Zaragoza. España: ACRIBIA S.A.

Farris S, Gobbi S, Torreggiani D, Piergiovanni L (2008) Assessment of two different rapid compression tests for the evaluation of texture differences in osmo-air-dried apple rings. J. Food Eng. 88: 484–491

Fernandes F, Rodrigues S, Gaspareto CP, Oliveira E (2006). Optimization of osmotic dehydration of bananas followed by air-drying. J. Food Eng. 77: 188-193

Galan S (1991) *La carambola y su cultivo*. FAO. Roma. 11-83

García S, Mejía G (2004) Evolución de las propiedades físicas y bioquímicas durante la cinética de deshidratación osmótica del carambolo (*Averrhoa carambola* L.) var, I cambola. Trabajo de grado, Programa de Química, Facultad de ciencias básicas y tecnologías, Universidad del Quindío. Armenia, Colombia.

Garcia SV, Schmalko ME, Tanzariello A (2007) Isotermas de adsorción y cinética de secado de ciertas hortalizas y aromáticas cultivadas en misiones. *Revista de investigación agropecuaria* 36:115-129.

Giraldo AD, Arévalo A, Ferreira A, Ferreira P, Valdes JC, Menezes MC (2010) Datos experimentales de la cinética del secado y del modelo matemático para pulpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) en rodajas. *Ciencia y tecnología de alimentos*. 30: 179-182.

Giraldo BD, Arango VL, Márquez CC (2004) Osmo-deshidratación de mora de castilla (*Rubus glaucus* Benth) con tres agentes edulcorantes Universidad Nacional de Colombia; Facultad de Ciencias Agropecuarias. Medellín.

González-Martínez C, Cháfer K, Xue M, Chiralt A (2006) Effect of the osmotic pre-treatment on the convective air drying kinetics of pear var. blanquilla, *International J. Food Properties*. 9: 541–549.

Granados C (1993) La Carambola (*Averrhoa carambola* L.) un cultivo promisorio en el país. *Agricultura tropical.Colombia*. 30: 1, 69.

Grabowski S, Marcotte M, Quan D, Taherian AR, Zareifard MR, Poirier M, Kudra T (2007) Kinetics and Quality Aspects of Canadian Blueberries and Cranberries Dried by Osmo-Convective Method. *Drying Technology*. 25: 367–374.

Holman,R (1998) *StarFruit* .Sheridan Fruit Company, Inc. Portland, OR.
<http://www.sheridanfruit.com>

Jakubczyk E, Sitkiewicz I, Lewicki PP (1997) Mechanical properties of dried apples. In *Proceedings of the international conference of Ph.D. students* (pp. 25±31). Miskolc, Hungary: University of Miskolc Press.

Josilma S, Souza J, Medeiros M, Magalhaes M, Rodrigues S, Fernandes F (2007) Optimization of osmotic dehydration of tomatoes in a ternary system followed by air-drying. *J. Food Eng.* 83: 501–509.

Koc B, Eren I, Kaymak F, (2008) Modelling bulk density, porosity and shrinkage of quince during drying: The effect of drying method. *J. Food Engineering*. 85: 340–349.

Koocheki A, Azarpazhooh E (2010) Evaluation of mass exchange during osmotic dehydration of plum using response surface methodology. *International J. of Food Properties*. 13: 155–166.

Korsrilabut J, Borompichaichartkul Ch, Duangmal K (2010) Effect of invert sugar on the drying kinetics and water mobility of osmosed-air dried cantaloupe. *International J. Food Science and technology*.45: 1524-1531.

Krokida MK, Maroulis ZB, Saravacos GD (2001) The effect of the method of drying on the colour of dehydrated products. *International J. of Food Science and Technology*, 36: 53–59.

Koyuncu T, Pinar Y, Lule F (2007) Convective drying characteristics of azarole red (*Crataegus monogyna* Jacq.) and yellow (*Crataegus aronia* Bosc.) fruits. *J. Food Eng.* 78: 1471-1475.

Ewa Kulak (2007) Aquí las estrellas caen de los árboles <http://www.ewakulak.com>.

Lazarides HN, Fito, P, Chiralt A, Gekas V, Lenart A (1999) Advances in osmotic dehydration. In *Processing Foods. Quality optimization and Process assessment*; Oliveira, F.A.R.; Oliveira,J.C.; Eds.; CRC Press: Boca Raton, FL: 175–199.

Lenart A (1994) Osmotic dehydration of fruits before drying. In *Minimal Processing of Foods and Process Optimization*; Singh, R.P.; Oliveira, F.A.R.; Eds.; CRC Press: London: 87–105.

Lewicki PP, Sitkiewicz I (1999) Effect of pre-drying treatment and storage on rheological properties of dried onion. *International J. of Food Properties*. 2: 23–37.

Lewicki PP, Lukaszuk A (2000) Effect of osmotic dewatering on rheological properties of apple subjected to convective drying. *J. of Food Eng* 45: 119-126.

Lewick P (2006) Design of hot air drying for better foods. *Trends in Food Science & Technology*. 17: 153-163.

Lewicki PP, Gondek E, Witrowa-Rajchert D, Nowak D (2001) Effect of drying on respiration of apple slices. *Journal of Food Engineering*. 49: 333–337.

Lewicki PP, Vu Le H, Pomaranska-Laznka W (2002) Effect of pretreatment on convective drying of tomatoes. *Journal of Food Engineering*. 54: 141–146.

Lemus-Mondaca R, Miranda M, Grau A, Briones V, Villalobos R,Vega-Galvez A (2009) Effect of Osmotic Pretreatment on Hot Air Drying Kinetics and Quality of Chilean Papaya (*Carica pubescens*). *Drying Technology*. 27: 1105–1115.

Lenart A, (1996) Osmo-convective drying of fruits and vegetables: Technology and application. *Drying Technology*. 14: 391–413.

Lombard GE, Oliveira JC, Fito P (2008) Osmotic dehydration of pineapple as a pre-treatment for further drying. *J. Food Eng.* 85: 277-284.

Mandala IG, Anagnostaras EF, Oikonomou CK (2005) Influence of osmotic dehydration conditions on apple air-drying kinetics and their quality characteristics. *J. Food Eng.* 69: 307-316.

Madamba PS, Driscoll RH, y Buckle KA (1996) The thinlayer drying characteristics of garlic slices. *J. Food Eng.* 29: 75–97.

Madamba PS (2003) Physical Changes in Bamboo (*Bambusa phyllostachys*) Shoot During Hot Air Drying: Shrinkage, Density, and Porosity. *Drying Technology.* 21: 555–568.

Maskan M, Giigiis F (1998) Sorption Isotherms and Drying Characteristics of Mulberry (*Torus alba*). *J. Food Eng.* 37: 437-449.

McMinn WAM y Magee TRA (1999) Studies on the effect of surfactant, blanching and osmotic pretreatments on the convective drying of potatoes. *Journal of Food Process Engineering.* 22:419–433.

Millán Trujillo FR, Arciniegas EL, Oropeza Noguera DC (2008) Desarrollo y optimización de un néctar a base de melón, parchitay limón a través del uso de la metodología de superficie de respuesta AGROLLANIA. 5: 9-24.

Moreira Azoube Lp, El-AouarNA Valeriano Tonon R, Kurozawa LE, Colato Antonio G, Xidieh Murr FE, Park KJ (2009) Effect of osmotic dehydration on the drying kinetics and quality of cashew apple. *International J. of Food Science and Technology.* 44: 980–986.

Moreira R, Sereno AM (2004) Control of Solids Uptake by Convective Drying Prior to Osmotic Processing of Foods. *Drying Technology.* 22: 745–757.

Moreira R, Chenlo F, Chaguri L, Oliveira H (2007) Drying of Chestnuts (*Castanea sativa* Mill.) after Osmotic Dehydration with Sucrose and Glucose Solutions. *Drying Technology.* 25: 1837–1845,

MORTON J (1987) *Carambola*. In: *Fruits of warm climates*. Miami, FL.
<http://www.newcrop.hort.purdue.edu>

Mújica-Paz H, Valdez-Fragoso A, López-Malo E, Palou E, Welti-Chanes J (2003) Impregnation and osmotic dehydration of some fruits: effect of the vacuum pressure and syrup concentration. *J. Food Eng.* 57: 305-314.

NAKASONE HY, PAULL RE (1998) *Tropical Fruits*. CAB International. Biddles Ltd, Guildford y King's Lynn. London. Pág. 37–43, 57, 133–147, 157, 187-188, 218.

Nieto A, Salvatori D, Castro MA, Alzamora SM (1998) Air drying behaviour of apples as affected by blanching and glucose impregnation. J. Food Eng. 36: 63–79.

Pani P, Avitabile L A, Riva M, Maestrelli A, Torreggiani D (2008) Influence of an osmotic pre-treatment on structure-property relationships of air-dehydrated tomato slices. J. Food Eng. 86: 105–112.

Park KJ, Bin A, Reis Brod FP (2002) Drying of pear d'Anjou with and without osmotic dehydration. J. Food Eng. 56: 97–103.

Passo Tsamo CV, Bilame AF, Ndjouenkeu R (2006) Air drying behaviour of fresh and osmotically dehydrated onion slices (*Allium cepa*) AND TOMATO FRUITS (*Lycopersicon esculentum*).

Piotrowski D, Lenart A, Wardzynski A (2004) Influence of osmotic dehydration on microwave-convective drying of frozen strawberries. J. Food Engineering. 65: 519–525.

Pokharkar S M, Prasad S, Das H (1997) A model for osmotic concentration of bananas slices. Journal Food Science and Technology. 34: 230–232.

Ochoa C. Ayala A. (2005) Modelos matemáticos de transferencia de masa en deshidratación osmótica. Ciencia y Tecnología Alimentaria. 4: 330-342.

Ochoa MR, Kessler AG, Pirone BN, Marquez CA, y De Michelis A (2002) Shrinkage during convective drying of whole rose hip (*Rosa rubiginosa* L.) fruits. Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie. 35: 400–406.

Ruiz-Lo'pez II, Huerta-Mora IR, Vivar-Vera MA, Martínez-Sánchez CE, Herman-Lara E (2010) Effect of Osmotic Dehydration on Air-Drying Characteristics of Chayote. Drying Technology. 28: 1201–1212.

Sacilik K, Elicin AK (2006) The thin layer drying characteristics of organic apple slices. J. of Food Engineering. 73: 281–289.

Sankat CK, Castaigne F, Maharaj R (1996) The air drying behaviour of fresh and osmotically dehydrated banana slices. International J. of Food Science and Technology. 31: 123–135.

Schmalko ME, Ayala M, Martín C, Carrattini D (2009) Isotermas de adsorción del polvo de la yerba mate con aglomerantes utilizados en el entrapamiento de compuestos; Ciencia y Tecnología de Alimentos: Avances en análisis físicos,

químicos y sensoriales; Trabajos completos presentados al III Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología de los Alimentos, Córdoba, Argentina.

Sereno A, Moreira R, Martinez E (2001) Mass transfer coefficients during osmotic dehydration of apple in single and combined aqueous solutions of sugar and salt. J. Food Eng. 47: 43-49.

Shi J, Pan Z, McHugh TH, Wood D, Hirschberg E, Olson D (2008) Drying and quality characteristics of fresh and sugar-infused blueberries dried with infrared radiation heating. Food Science and Technology. 41: 1962 - 1972.

Simal S, Deyá M, Frau M, y Rosselló C (1997) Simple modelling of air drying curves of fresh and osmotically pre-dehydrated apple cubes. J. Food Eng. 33:139-150.

Singh B, Gupta AK (2007) Mass transfer kinetics and determination of effective diffusivity during convective dehydration of pre-osmosed carrot cubes. J. of Food Eng. 79: 459-470.

Souza JS, Medeiros MFD, Magalhães MMA, Rodrigues S, Fernandes FAN (2007) Optimization of osmotic dehydration of tomatoes in a ternary system followed by air-drying. J. of Food Engineering. 83: 501–509.

Tan M, Chua KJ, Mujumdar AS, Chou SK (2001) Effect of osmotic pre-treatment and infrared radiation on drying rate and color changes during drying of potato and pineapple. Drying Technology, 19: 2193–2207.

Tsami E, Katsioti M (2000) drying kinetics for some fruits: predicting of porosity and color during dehydration. Drying Technology, 18: 1559 — 1581

Teles U, Fernandez F, Rodriguez S, Lima A, Maia G (2006) Optimization of osmotic dehydration of melons followed by air-drying. International J. of Food Science and Technology, 41: 674–680.

Telis J, do Amaral P (2003) Caída de presión en lecho fijo de cubos de papa, remolacha y zanahoria considerando encogimiento. Cienc. Tecnol. Aliment. 23.

Tello O, García R, Vásquez O (2002) Conservación de Averrhoa carambola "carambola" por azúcar y calor. Revista Amazónica de Investigación Alimentaria 2: 49 - 58

Tello C, Moncada R, Vega A (2011) Influence of hot-air temperature on drying kinetics, functional properties, colour, phycobiliproteins, antioxidant capacity, texture and agar yield of alga *Gracilaria chilensis*. LWT Food Science and Technology. 44: 2112-2118.

Torringa E, Esveld E, Scheewe I, van den Berg R, Bartels P (2001) Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave-hot-air drying of mushrooms. J. Food Eng. 49: 185–191.

Torreggiani D, y Bertolo G (2001) Osmotic pre-treatments in fruit processing: chemical, physical and structural effects. J. Food Eng. 49: 247–253.

Vijayanand P, Chand N y Eipeson WE (1995) Optimization of osmotic dehydration of cauliflower. Journal of Food Processing and Preservation. 19: 229–242.

Villegas BE (1998) El Carambolo (*Averrhoa carambola*). En: Especies Vegetales Promisorias; Seminario regional. Universidad Nacional de Medellín; Facultad de Ciencias Agropecuarias; Departamento de Agronomía; Grupo de Especies Vegetales Promisorias. Medellín.

Wilhelm L, Dwayne AS, Brusewitz G (2004) Introduction problem-solving. Chapter 1 in Food & Process Engineering Technology. 260-270.

9. ANEXOS

ANEXO A: Pre-liminares contenido de humedad de la deshidratación osmótica de carambolo.

	45 % BRIX	55 % BRIX	65 % BRIX
t (min)	Xw kg agua/kg bh	Xw kg agua/kg bh	Xw kg agua/kg bh
0	0,8996	0,9202	0,8946
15	0,8243	0,8028	0,7910
30	0,7941	0,7743	0,7584
60	0,7361	0,7213	0,7131
120	0,6398	0,6300	0,6183
180	0,6239	0,5424	0,5385
240	0,5892	0,5167	0,4291
300	0,5862	0,4757	0,4190

ANEXO B: ANÁLISIS PÉRDIDA DE HUMEDAD DE LAS VARIABLES DE PROCESO X_1 Y X_2 .

De acuerdo a los resultados obtenidos en las cinéticas de secado se determinó la pérdida de humedad de los carambolos secos con un pre-tratamientos osmótico

en los tiempo de secado de 60,120, y 180 min. Por tal motivo se aplica un modelo matemático de superficie de respuesta a los tres tiempos de secado como se observa en la matriz de respuesta (tabla 3) para determinar si las variables de proceso, temperatura de secado (X_1) y tiempo de deshidratación osmótica(X_2) permiten obtener los mejores resultados.

Se aplicó un modelo de superficie de respuesta de segundo orden (Ec. 11) de la forma:

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1^2 + \beta_4 X_2^2 + \beta_5 X_1 * X_2 \quad \text{Ec.11}$$

Por medio del análisis de varianza (ANDEVA), se determinó que no existían diferencias significativas ($p \geq 0,05$) en el modelo aplicado. Por tanto este no resultó apropiado para explicar la relación funcional entre la pérdida de humedad del producto para los diferentes tiempos de secado y las variables predictoras, tiempo de deshidratación osmótica (X_2) y temperatura de secado (X_1), tal como se indica en la tabla 4.

Tabla 13: Matriz de respuesta pérdida de humedad según el diseño DCCR.

Tratamiento	Repet	TDO (min)	T (°C)	TDO (min)	T (°C)	ΔX_w t (60 min)	ΔX_w T (120 min)	ΔX_w t (180 min)
1	1	-1	-1	60	55	0,5414	0,8323	0,9374
2	1	-1	1	60	65	0,5585	0,9089	0,9716
3	1	1	-1	140	55	0,5924	0,7810	0,8063
4	1	1	1	140	65	0,6774	0,9197	0,9582
5	1	-2	0	20	60	0,5442	0,8882	0,9825
6	1	2	0	180	60	0,7091	0,9022	0,9351
7	1	0	-2	100	50	0,5361	0,9164	0,9164
8	1	0	2	100	70	0,7163	0,9170	0,9550
9	1	0	0	100	60	0,6412	0,9082	0,9570
9	1	0	0	100	60	0,6404	0,9137	0,9586
9	1	0	0	100	60	0,6446	0,9016	0,9503
9	1	0	0	100	60	0,6566	0,8939	0,9425

9	1	0	0	100	60	0,5864	0,8929	0,9645
1	2	-1	-1	60	55	0,4965	0,8058	0,9278
2	2	-1	1	60	65	0,6220	0,9039	0,9753
3	2	1	-1	140	55	0,6223	0,8882	0,9407
4	2	1	1	140	65	0,6665	0,9282	0,9727
5	2	-2	0	20	60	0,5815	0,9036	0,9710
6	2	2	0	180	60	0,7182	0,8961	0,9357
7	2	0	-2	100	50	0,5247	0,8378	0,9367
8	2	0	2	100	70	0,8341	0,9386	0,9857

TDO: Deshidratación osmótica, T: Temperatura de secado

Tabla 14: Análisis de varianza (ANOVA) para la pérdida de humedad.

	Tiempo de secado (min)		
	60	120	180
Regresión	0,051*	0,00066 (ns)	0,0066 *
Lineal	0,051 (ns)	0,0065 (ns)	0,0059 (ns)
Cuadrático	0,00038 (ns)	0,000063 (ns)	0,000008 (sn)
Producto cruzado	0,000011 (ns)	0,000001 (ns)	0,00065 (ns)
R ² (%)	83,72	54,20	72,67

*Significativo al nivel de ≤ 0.05 ; **Altamente significativo al nivel del 0.01; ns No significativo

En el tiempo de 60 min de secado el coeficiente de determinación R^2 , fue adecuado porque los valores de R^2 fueron superiores a 80%. El modelo de regresión explica bien el proceso. Resultados similares fueron encontrado por Joglekar y May, 1987. Citado por: Koocheki et al., 2010. Los tiempos de 120 y 180 min de secado el coeficiente de determinación R^2 , no fue adecuado porque los valores de R^2 fueron inferiores al 80 %, por lo tanto no pueden explicar la variabilidad de los datos (Tabla 4).

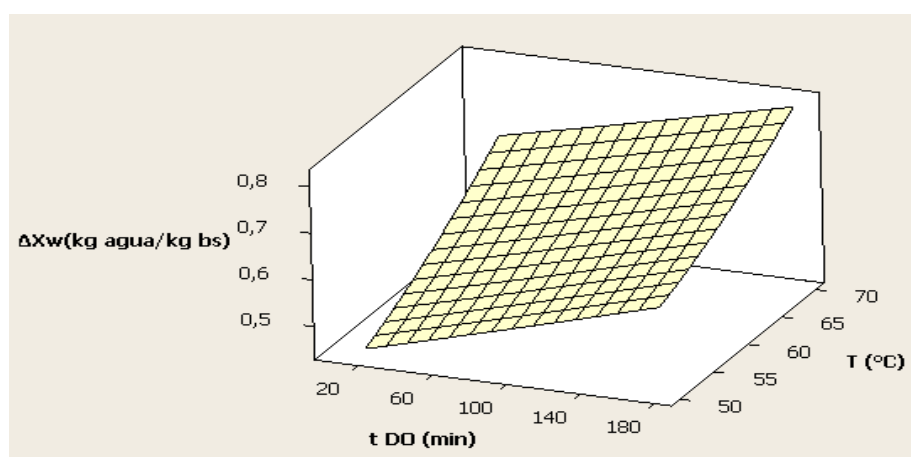
Del análisis de superficie de respuesta se obtuvo las interacciones entre variables. Estas no fueron significativas ($p \geq 0,05$). Por tanto la pérdida de humedad no fue afectada por el tiempo de deshidratación osmótica y la temperatura de secado (Tabla 5).

Tabla 15: Regresión para superficie de respuesta de segundo orden pérdida de humedad.

TERMINOS	Tiempo de secado (min)		
	60	120	180
β_0	0,4258 (ns)	0.5518 (ns)	0.8830
$\beta_1 X_1$	-0.0079 (ns)	0.0064 (ns)	0.00059
$\beta_2 X_2$	0.001 (ns)	0.00013 (ns)	-0.0041
$\beta_3 X_1^2$	0.00016 (ns)	-0.000017 (ns)	-0.000073
$\beta_4 X_2^2$	0.00000 (ns)	-0.000001 (ns)	0.000000
$\beta_5 X_1 * X_2$	-0.000008 (ns)	0.000003 (ns)	0.000064

*Significativo al nivel de ≤ 0.05 ; **Altamente significativo al nivel del 0.01; ns No significativo

En la Figura 11 se muestra la interacción de los efectos del tiempo de deshidratación osmótica y la temperatura de secado en un tiempo de secado de 60 min. Se puede afirmar que la única variable que está interactuando en el proceso de secado del carambolo es la temperatura. El tiempo de deshidratación osmótica no es significativo en el proceso de secado debido a que el proceso osmótico, tiende a incorporar la sacarosa a los tejidos de la fruta, y después de un tiempo de deshidratación la difusión de la sacarosa no es significativa y después de este periodo sólo se elimina agua de la fruta de acuerdo a Teles et al. (2006).



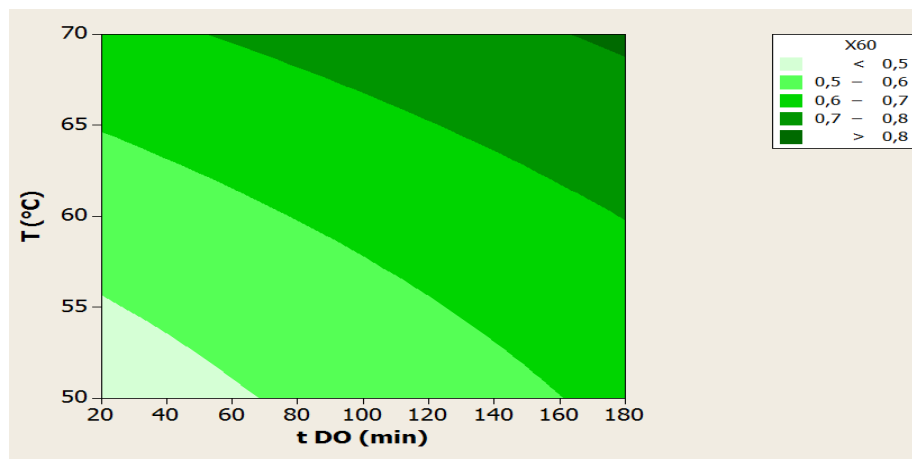


Figura 23: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto de la temperatura y el tiempo de deshidratación osmótica sobre la pérdida de humedad en un tiempo de secado de 60 min.

Los resultados asociados a la pérdida de humedad se relacionan con la temperatura y la deshidratación osmótica.

Al aumentar la temperatura y el tDO se aumenta la pérdida de humedad, pero si Esto también se observa en la gráfica de contorno. Al aumentar la temperatura 60°C a 65 °C, y aumentar el tiempo de deshidratación osmótica de 100 a 120 min, se obtiene una mayor pérdida del contenido de humedad.

La figura 12 muestra la interacción del tiempo de deshidratación osmótica y la temperatura de secado en un tiempo de secado de 120 min. Para los tratamientos la temperatura de secado fue importante para la pérdida de humedad de la muestra. Al aumentar la temperatura, aumenta la pérdida de humedad. Mientras que el tiempo de deshidratación osmótica no influyo en los tratamientos, se debe al daño de las membranas celulares generado por la deshidratación osmótica de acuerdo a lo observado por Souza et al., 2007. Por lo tanto la difusión de agua aumenta al aumentar la temperatura de secado según lo establecido por Park K et al., 2002.

En la figura 12 de la gráfica de contorno se ilustra la interacción de la temperatura y el tiempo de deshidratación osmótica. Si la temperatura se deja constante (60°C) y se aumenta el tiempo de deshidratación osmótica de 100 a 180 min, no se

observa un cambio en la pérdida de humedad. Si el tiempo de deshidratación osmótica es constante (100 min) y aumentamos la temperatura de secado de 60 a 70°C aumenta la pérdida del contenido de humedad.

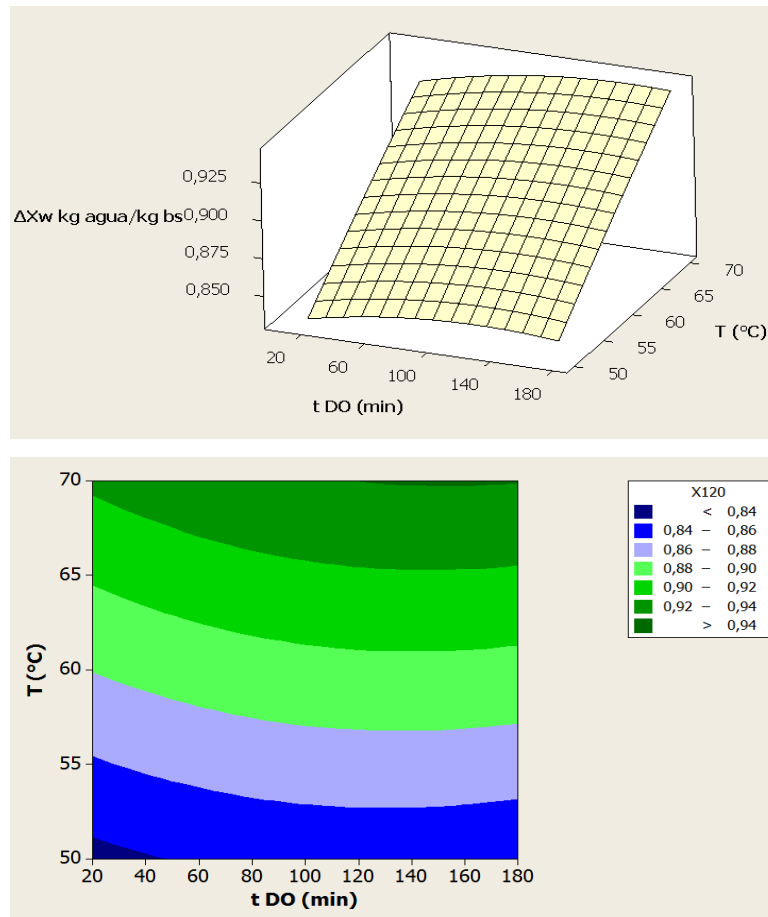


Figura 24: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto de la temperatura y el tiempo de deshidratación osmótica sobre la pérdida de humedad en un tiempo de secado de 120 min.

La figura 13 muestra la interacción del tiempo de deshidratación osmótica y la temperatura de secado en un tiempo de secado de 180 min. Al aumentar la temperatura y el tiempo de deshidratación osmótica, el valor de la pérdida de humedad permanece contante.

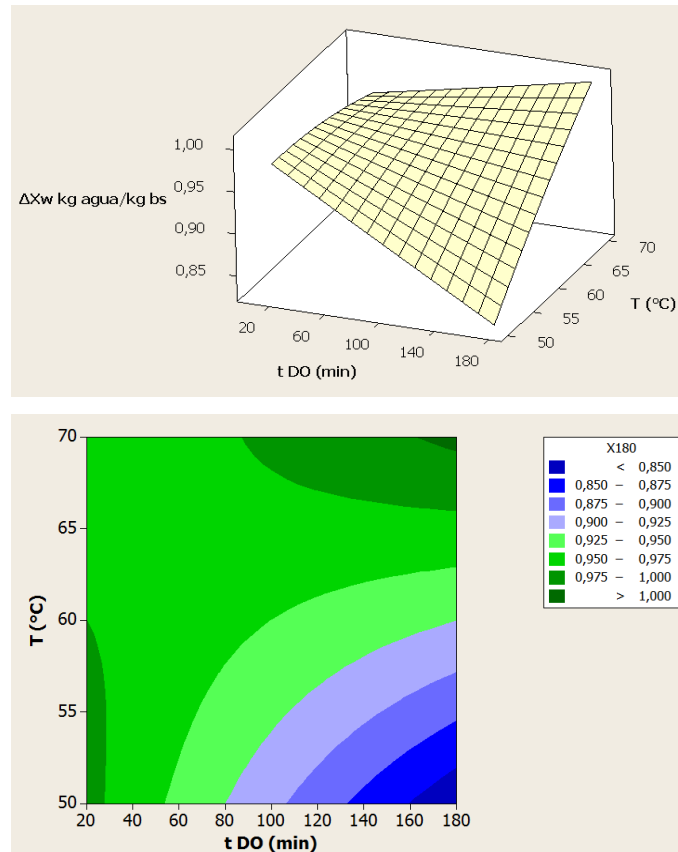


Figura 25: Superficie de respuesta y el contorno que muestra el efecto de la temperatura y el tiempo de deshidratación osmótica sobre la pérdida de humedad en un tiempo de secado de 180 min.

Si se disminuye la temperatura y aumenta el tiempo de deshidratación osmótica, el valor de la pérdida de humedad disminuye. Aumenta la temperatura de secado y el tiempo de deshidratación osmótica la pérdida de humedad aumenta.

Este comportamiento se corrobora con la superficie de contorno. Si se aumenta la temperatura de 60 a 70 °C y el tiempo de deshidratación osmótica aumenta de 100 a 120 min, aumenta la pérdida de humedad.

La figura 14 indica la relación de las gráficas de contornos donde muestra el efecto de la temperatura y el tiempo de deshidratación osmótica sobre la pérdida de humedad en los tiempos de secado de 60, 120 y 180 min. Se encontró que a partir de un tiempo de deshidratación osmótica de 100 min y una temperatura de secado entre 60 - 65 °C se obtienen las mayores variaciones en la pérdida de humedad en los tres tiempos de secado.

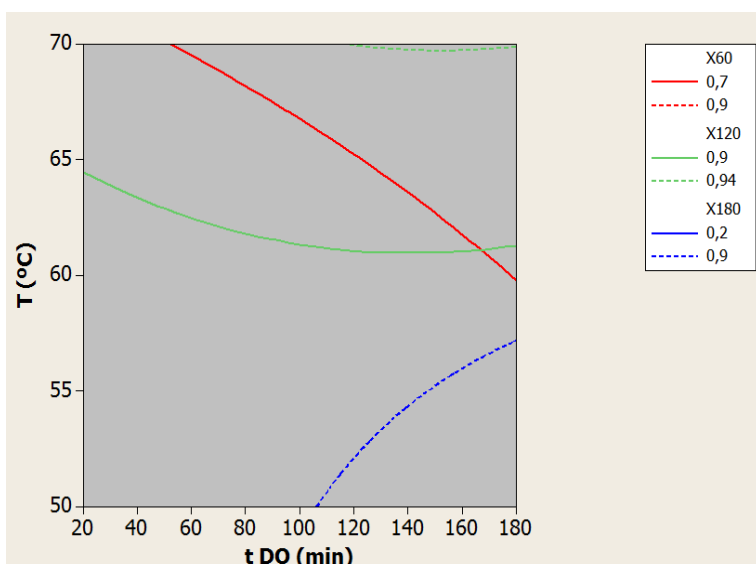


Figura 26: El contorno que muestra el efecto de la temperatura y el tiempo de deshidratación osmótica sobre la pérdida de humedad en un tiempo de secado de 60, 120 y 180 min.

ANEXO C: Cálculos difusividad y energía de activación del carambolo a 100 min de deshidratación osmótica y temperaturas de secado de 50, 60 y 70 ° C.

Difusividad y energía de activación carambolos frescos

Difusividad carambolo fresco:

Términos SOLVER	0	1	2	3
50°C				
$8/(2n+1)^2 p^2$	0,810565678	0,090062853	0,032422627	0,016542157
$(-(2n+1)^2 p^2 Fo)$	-53,93268676	-485,3941808	-1348,317169	-2642,701651
$\exp(-(2n+1)^2 p^2 Fo)$	3,77861E-24	1,5703E-211	0	0
$8/(2n+1)^2 p^2 \exp(-(2n+1)^2 p^2 Fo)$	3,06281E-24	1,4143E-212	0	0
60 °C				
$8/(2n+1)^2 p^2$	0,810565678	0,090062853	0,032422627	0,016542157
$(-(2n+1)^2 p^2 Fo)$	-53,93268676	-485,3941808	-1348,317169	-2642,701651
$\exp(-(2n+1)^2 p^2 Fo)$	3,77861E-24	1,5703E-211	0	0
$8/(2n+1)^2 p^2 \exp(-(2n+1)^2 p^2 Fo)$	3,06281E-24	1,4143E-212	0	0
70°C				
$8/(2n+1)^2 p^2$	0,810565678	0,090062853	0,032422627	0,016542157
$(-(2n+1)^2 p^2 Fo)$	-56,69739846	-510,2765861	-1417,434961	-2778,172525
$\exp(-(2n+1)^2 p^2 Fo)$	2,38031E-25	2,453E-222	0	0
$8/(2n+1)^2 p^2 \exp(-(2n+1)^2 p^2 Fo)$	1,92939E-25	2,2092E-223	0	0

ANEXO B. (Continuación)

CARAMBOLOS FRESCOS			
	50°C	60 °C	70 °C

Tiempo (seg)	Xt-Xe/Xo-Xe	Fo	Xt-Xe/Xo-Xe	Fo	Xt-Xe/Xo-Xe	Fo
0	1,0000	-0,00135016	1,0000	-0,001350162	1,0000	-0,001350162
60	0,9953	-0,00124182	0,9958	-0,001251914	0,9933	-0,001192741
120	0,9908	-0,00113392	0,9913	-0,001145058	0,9868	-0,001034772
180	0,9856	-0,0010055	0,9855	-0,001004284	0,9801	-0,000865576
240	0,9798	-0,00085961	0,9800	-0,000864995	0,9725	-0,000665891
300	0,9747	-0,00072613	0,9743	-0,000713128	0,9642	-0,000436777
360	0,9687	-0,00056241	0,9655	-0,000472959	0,9566	-0,000213326
420	0,9632	-0,00040723	0,9588	-0,000279721	0,9477	5,91036E-05
480	0,9574	-0,00023819	0,9530	-0,000105024	0,9393	0,00033423
540	0,9515	-5,8389E-05	0,9455	0,00012843	0,9303	0,000641162
600	0,9450	0,00014505	0,9400	0,000310415	0,9212	0,000975125
660	0,9388	0,00035099	0,9536	-0,000124204	0,9123	0,001322142
720	0,9327	0,00055731	0,9259	0,000799378	0,9043	0,001649821
780	0,9279	0,00072933	0,9197	0,001031916	0,8955	0,002031828
840	0,9218	0,00095109	0,9128	0,001302618	0,8869	0,002428648
900	0,9159	0,00117824	0,9058	0,00158616	0,8775	0,002884659
1200	0,8849	0,00252423	0,8673	0,003419158	0,8340	0,005397875
1500	0,8557	0,00406247	0,8386	0,005102418	0,7903	0,008631644
1800	0,8407	0,00497242	0,8057	0,007413537	0,7430	0,012972818
2100	0,7981	0,00800239	0,7725	0,010165578	0,7069	0,016869662
2400	0,7695	0,01043079	0,7399	0,013280644	0,6637	0,022209669
2700	0,7438	0,01580073	0,7073	0,016825882	0,6222	0,028028667
3000	0,7163	0,01897329	0,6769	0,020497596	0,5873	0,033447919
3300	0,6891	0,02224269	0,6467	0,024514495	0,5479	0,040154422
3600	0,6634	0,02956179	0,6162	0,028929105	0,5098	0,047254259
4200	0,6120	0,03864332	0,5565	0,038634955	0,4489	0,059966565
4800	0,5565	0,04619176	0,4957	0,050033196	0,3692	0,079686232
5400	0,5153	0,05532572	0,4425	0,061406033	0,3042	0,099300388
6000	0,4702	0,06543507	0,3890	0,074425411	0,2370	0,124599116
6600	0,4252	0,07613745	0,3388	0,088396646	0,1912	0,146331885
7200	0,3824	0,08804803	0,2893	0,104395555	0,1445	0,17469197
7800	0,3400	0,09968948	0,2331	0,126282029	0,1048	0,20723281
8400	0,3030	0,11405886	0,2034	0,140068142	0,0697	0,248526371
9000	0,2630	0,12749738	0,1671	0,16001297	0,0494	0,283426152
9600	0,2303	0,1428805	0,1291	0,186153594	0,0287	0,338673593
10200	0,1979	0,15939423	0,1041	0,207945053	0,0216	0,367065196
10800	0,1681	0,17681073	0,0794	0,23538755	0,0144	0,408414919
11400	0,1416	0,19367015	0,0547	0,273217344	0,0088	0,457951771
12000	0,1199	0,21787533	0,0411	0,302197693	0,0056	0,503892372
12600	0,0944	0,24402373	0,0295	0,33578563	0,0038	0,543814716

13200	0,0729	0,2639646	0,0195	0,37784622	0,0024	0,58794458
13800	0,0599	0,29479631	0,0122	0,424861491	0,0018	0,617977973
14400	0,0442	0,32616857	0,0071	0,479606829	0,0012	0,657569577
15000	0,0324	0,36887989	0,0091	0,455205219	0,0005	0,739441568
15600	0,0213	0,41704446	0,0029	0,570906246	0,0005	0,739355482
16200	0,0132	0,51208985	0,0015	0,570906246	0,0005	0,754728222
16800	0,0052	5,31209001	0,0012	0,664497936	0,0001	0,897916655
17400	-0,0008	5,31209001	0,0008	5,464498102	0,0001	0,944620488
18000	-0,0059	5,31209001	-0,0001	5,464498102	0,0000	5,744620654

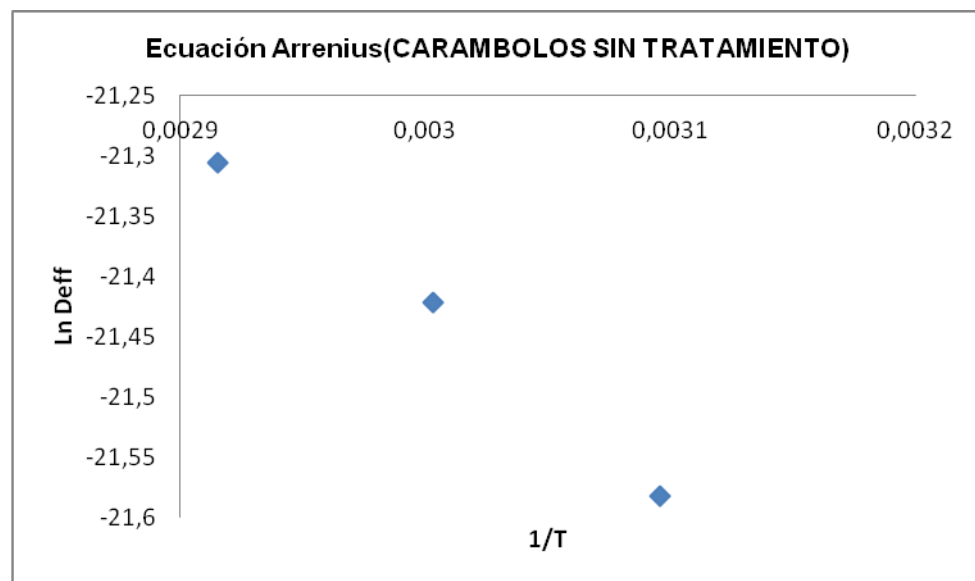
Difusividad efectiva del agua carambolos sin tratamiento

$$De = \text{Pendiente} \cdot 4 \cdot L^2$$

	Pendiente	Espesor	Mitad espesor del	D_{eff}
50°C	2,33E-05	4,26	0,00213	4,24E-10
60°C	3,24E-05	3,92	0,00196	4,97E-10
70°C	4,89E-05	3,38	0,00169	5,59E-10

ANEXO B. (Continuación)

Energía de activación carambolo fresco



Influencia de la temperatura en la D_{eff} en carambolos sin tratamiento

Energía de activación carambolo con tratamiento

	Temperatura	Deff				
--	-------------	------	--	--	--	--

°K	secado convección (°C)		1/T X	Ln Deff Y	R Kj.mol-1*K-1	Ea= 1*pendiente*R kJ*mol-1
323	50	4,23612E-10	0,00309598	- 21,5822036	0,0083143	12,7632
333	60	4,97368E-10	0,003003	- 21,4216912		
343	70	5,58681E-10	0,00291545	- 21,3054423		

ANEXO B. (Continuación)

Difusividad y energía de activación carambolos con tratamiento

Difusividad carambolo con tratamiento: (100 min deshidratación osmótica – temperatura de secado 50, 60 y 70 °C)

Términos SOLVER	0	1	2	3
50 °C				
$8/(2n+1)^2 p^2$	0,810565678	0,090062853	0,032422627	0,016542157
$(-(2n+1)^2 p^2 F_0)$	0	0	0	0
$\exp(-(2n+1)^2 p^2 F_0)$	1	1	1	1
$8/(2n+1)^2 p^2 \exp(-(2n+1)^2 p^2 F_0)$	0,810565678	0,090062853	0,032422627	0,016542157
60 °C				
$8/(2n+1)^2 p^2$	0,810565678	0,090062853	0,032422627	0,016542157
$(-(2n+1)^2 p^2 F_0)$	-10,34920857	-93,14287716	-258,7302143	-507,1112201
$\exp(-(2n+1)^2 p^2 F_0)$	3,20181E-05	3,53641E-41	4,3142E-113	5,8129E-221
$8/(2n+1)^2 p^2 \exp(-(2n+1)^2 p^2 F_0)$	2,59528E-05	3,18499E-42	1,3988E-114	9,6158E-223
70 °C				
$8/(2n+1)^2 p^2$	0,810565678	0,090062853	0,032422627	0,016542157
$(-(2n+1)^2 p^2 F_0)$	-51,94166273	-467,4749646	-1298,541568	-2545,141474
$\exp(-(2n+1)^2 p^2 F_0)$	2,76708E-23	9,5105E-204	0	0
$8/(2n+1)^2 p^2 \exp(-(2n+1)^2 p^2 F_0)$	2,2429E-23	8,5654E-205	0	0

CARAMBOLO CON TRATAMIENTO						
50°C			60 °C		70°C	
Tiempo (seg)	Xt-Xe/Xo- Xe	Fo	Xt-Xe/Xo- Xe	Fo	Xt-Xe/Xo- Xe	Fo
0	1,0000	-0,00135017	1,0000	-0,001350162	1,0000	-0,001350162
30	0,9980	-0,00130374	0,9949	-0,001232389	0,9766	-0,000774271
60	0,9931	-0,001188964	0,9910	-0,001138078	0,9497	-3,03038E-06
90	0,9883	-0,001073144	0,9868	-0,001036964	0,9324	0,000569646
120	0,9847	-0,000984435	0,9820	-0,00091526	0,9279	0,000730078

150	0,9774	-0,000796799	0,9752	-0,000738266	0,9053	0,001607809
180	0,9722	-0,000658129	0,9702	-0,000603939	0,8773	0,002898178
210	0,9688	-0,000565441	0,9623	-0,000381593	0,8597	0,003837187
240	0,9642	-0,000436152	0,9561	-0,000198005	0,8530	0,004222171
270	0,9580	-0,000256516	0,9503	-2,23878E-05	0,8400	0,00501446
300	0,9476	6,19484E-05	0,9439	0,000181099	0,8321	0,005526799
360	0,9414	0,000262507	0,9308	0,000626529	0,8204	0,006331064
420	0,9296	0,000665771	0,9176	0,00111441	0,8056	0,007419893
480	0,9182	0,001090216	0,9037	0,001675306	0,7835	0,009201811
540	0,9065	0,001556977	0,8902	0,002273925	0,7696	0,010423198
600	0,8964	0,001989824	0,8766	0,002933564	0,7521	0,012064323
660	0,8856	0,002487717	0,8665	0,003460234	0,7316	0,014140084
720	0,8770	0,002913197	0,8504	0,004374647	0,7129	0,016189046
780	0,8664	0,003466424	0,8366	0,005229424	0,7001	0,017656731
840	0,8565	0,004019059	0,8234	0,006118711	0,6853	0,01944659
900	0,8452	0,004687007	0,8194	0,006398225	0,6738	0,020896085
1200	0,7942	0,008310937	0,7470	0,012565832	0,5724	0,035906478
1500	0,7462	0,012647411	0,6873	0,019204632	0,4921	0,05076286
1800	0,6974	0,01797794	0,6294	0,026969006	0,4391	0,062196758
2100	0,6495	0,024120787	0,5676	0,036716293	0,3950	0,072872786
2400	0,6110	0,029714435	0,5270	0,043965814	0,3515	0,084682226
2700	0,5655	0,03708345	0,4766	0,053959313	0,2999	0,100747763
3000	0,5272	0,043926374	0,4291	0,06450869	0,2679	0,112169636
3300	0,4820	0,052845317	0,3877	0,07476663	0,2296	0,127802323
3600	0,4485	0,0600543	0,3494	0,085277401	0,1973	0,143183164
4200	0,3662	0,080519508	0,2715	0,110838243	0,1365	0,180521958
4800	0,3124	0,096618643	0,2135	0,135167707	0,1056	0,206496112
5400	0,2588	0,115683984	0,1667	0,160255461	0,0733	0,243549174
6000	0,2049	0,139340048	0,1251	0,189354494	0,0615	0,261238029
6600	0,1695	0,158558809	0,0939	0,218369771	0,0529	0,276517465
7200	0,1357	0,181052149	0,0744	0,241984724	0,0386	0,308360398
7800	0,1076	0,20459832	0,0563	0,270227383	0,0224	0,363666544
8400	0,0860	0,227296158	0,0451	0,29259896	0,0161	0,397197361
9000	0,0688	0,249982105	0,0369	0,31310367	0,0142	0,409998824
9600	0,0545	0,273442476	0,0301	0,333515918	0,0123	0,424090003
10200	0,0448	0,293331375	0,0245	0,354571455	0,0158	0,399008343
10800	0,0369	0,31315366	0,0206	0,372025552	0,0063	0,492481523
11400	0,0281	0,340564197	0,0168	0,392614885	0,0068	0,484155305
12000	0,0239	0,357055178	0,0146	0,407225113	0,0065	0,489356485
12600	0,0192	0,379305303	0,0121	0,425861832	0,0054	0,508229301
13200	0,0170	0,391334008	0,0101	0,443822007	0,0093	0,452885586

13800	0,0133	0,416133949	0,0083	0,464632137	0,0114	0,431654655
14400	0,0106	0,439749809	0,0066	0,487827865	0,0063	0,49281155
15000	0,0079	0,468676592	0,0094	0,451653072	0,0091	0,454495567
15600	0,0067	0,486537893	0,0045	0,526715155	0,0025	0,587508688
16200	0,0042	0,533646467	0,0000		0,0042	0,532582158
16800	0,0028	0,575535031	0,0012		0,0033	0,557022229
17400	0,0016	0,628043748	0,0000		0,0084	0,462765968
18000			0,0000		0,0000	

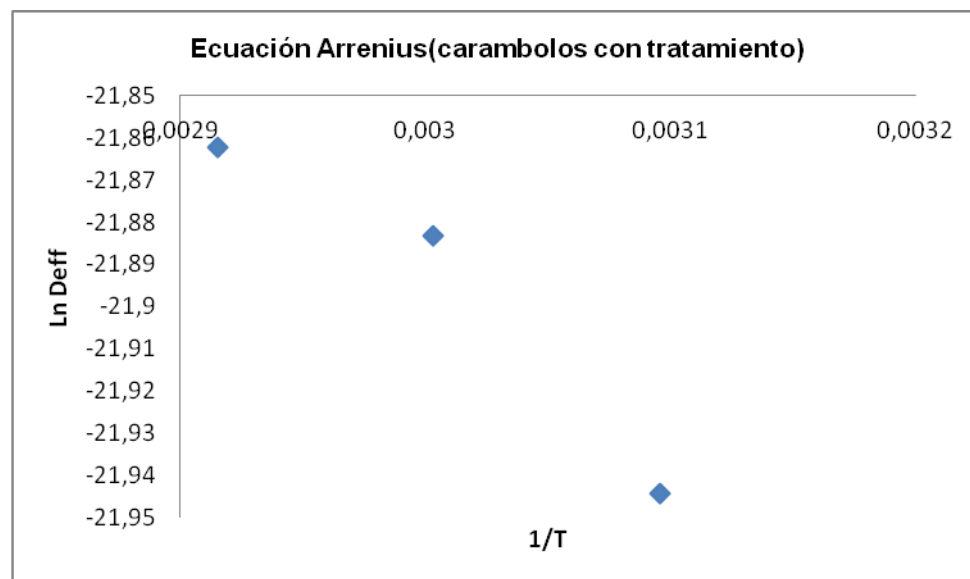
ANEXO D. (Continuación)

Difusividad efectiva del agua carambolos con tratamiento

$$De = \text{Pendiente} \cdot 4 \cdot L^2$$

	Pendiente	Espesor	Mitad del espesor	D_{eff}
50°C	3,2770E-05	0,003	0,0015	2,95E-10
60°C	3,4833E-05	0,003	0,0015	3,13E-10
70°C	3,55687E-05	0,003	0,0015	3,20E-10

Energía de activación carambolo con tratamiento: (100 min deshidratación osmótica – temperatura de secado 50, 60 y 70 °C)



Influencia de la temperatura en la D_{eff} en carambolos con tratamiento

Energía de activación carambolo con tratamiento

°K	Temperatura a secado convección (°C)	Deff	1/T X	Ln Deff Y	R Kj.mol-1*K-1	Ea= -1*pendiente*R kJ*mol-1
323	50	2,9682E-10	0,0030959 8	-21,944278		
333	60	3,0967E-10	0,003003	-21,883232	0,0083143	3,7914
343	70	3,2229E-10	0,0029154	-21,862331		

ANEXO 1: Gráfica porosidad Vs Contenido de humedad del carambolo a 100 min de deshidratación osmótica y temperatura de secado de 50, 60, y 70 °C.

